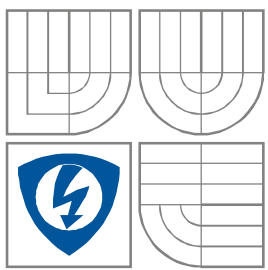
	<p><b>VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ</b> BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY</p>
	<p><b>FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ</b> <b>ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY</b>  FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS</p>

# POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ NETRADIČNÍCH TRYCHTÝŘOVÝCH ANTÉN

COMPUTER MODELLING OF NON-CONVENTIONAL HORN ANTENAS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Jan Divín

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. Lukáš Oliva

BRNO, 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Divín  
Bytem: Háje 24, Zubří, 756 54  
Narozen/a (datum a místo): 27. ledna 1986 ve Valašském Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Počítačové modelování netradičních trychtýřových antén

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Lukáš Oliva

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá průzkumem optimalizační metody PSO a jejího uplatnění na navýšení směrovosti rotačně symetrických trychtýřových antén. K tomuto účelu byl využit osově symetrický 2D model z programu Comsol Multiphysics.

## **Annotation**

This Bachelor's Thesis is dealing with research of optimization method PSO and its using to increase directionality axial symmetry horn antennas. Axial symmetry 2D model from program Comsol Multiphysics was used for this purpose.

## **Klíčová slova**

trychtýřové antény, Comsol Multiphysics, metoda konečných prvků, PSO optimalizace, Comsol Multiphysics, metoda konečných diferencí, vidy/módy TE, jedinec, kritériální funkce, pbest, gbest, okrajové podmínky/stěny

## **Keyword**

Horn antennas, Comsol Multiphysics, Finite element method, Particle Swarm Optimization, Comsol Multiphysics, Finite differences method, Modes TE, Particle, The Fitness Function, Pbest, Gbest, Boundary Conditions

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Počítačové modelování netradičních trychtýřových antén jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukášovi Olivovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

## Obsah

1 Úvod.....	6
2 Trychtýřová anténa (přehled použitých antén) .....	7
2.1 Trychtýřová anténa s kruhovým průřezem vlnovodu .....	7
3 Způsob výpočtu parametrů antény .....	9
3.1 Metoda konečných prvků.....	9
3.2 Vidy šířící se vlnovodem průměru 20 mm.....	11
3.3 Sestrojení trychtýřové antény v programu Comsol .....	15
3.3.1 Sestrojení trychtýřové antény ve 2D .....	15
3.3.2 Sestrojení trychtýřové antény ve 3D .....	18
3.4 Porovnání 2D a 3D modelu .....	20
4 Optimalizace antény .....	22
4.1 PSO optimalizace .....	22
4.1.1 Termíny používané v PSO.....	22
4.1.2 Postup při výpočtu optimalizace za pomoci PSO. ....	22
4.1.3 Okrajové podmínky.....	24
4.2 Použitý PSO algoritmus.....	24
4.3 Výsledky optimalizace .....	25
4.3.1 Porovnání dvou různých rovnic pro aktualizaci částečky v PSO optimalizaci pro jednoduchou trychtýřovou anténu. ....	25
4.3.2 Porovnání typů okrajových podmínek v PSO optimalizaci pro jednoduchou trychtýřovou anténu .....	30
4.3.3 Výsledky získané optimalizací rotačně symetrické antény s přidáním lamelové čočky .....	31
5 Ověření dosažených výsledků v programu CST Microwave Studio .....	35
5.1 Jednoduchá trychtýřová anténa s optimalizovanými rozměry.....	35
5.2 Trychtýřová anténa s optimalizovanými rozměry a zařazenou lamelovou čočkou za její aperturu.....	36
6 Závěr .....	39
7 Literatura .....	40

## Seznam Příloh

1. Zdrojový kód pro kořeny Besselovy funkce .....	1
2. Zdrojový kód PSO optimalizace.....	1
3. Schéma znázornění algoritmu PSO optimalizace trychtýřové antény .....	4
4. Výkresy optimalizovaných trychtýřových antén .....	6

# 1 Úvod

Antény pracující v oblasti mikrovlnných kmitočtů jsou nedílnou součástí dnešní telekomunikační techniky, a to od radioreléových spojů až po spoje kosmické. Dominantní zastoupení v oblasti centimetrových vln mají plošné antény. Mezi nejpoužívanější plošné antény patří bezesporu **trychtýřové antény** s různým provedením trychtýře (plochý trychtýř, kuželový trychtýř - viz. obr.2.1 a), 2.1 b). Typickým příkladem použití trychtýřové antény je např. primární zářič pro parabolické reflektory.

Tato semestrální práce se zabývá simulací a optimalizací rotačně symetrické jednoduché trychtýřové antény, respektive její varianty s fokusující mikrovlnnou čočkou vedoucí ke zvýšené směrovosti ve směru osy trychtýře. Analytický popis výše zmíněných antén je velmi složitý, proto je snazší využít numerický model vytvořený pomocí programu **Comsol Multiphysics**, založené na **metodě konečných prvků**. Vybrán byl především kvůli možnosti zjednodušené simulace rotačně symetrických struktur. Cílem optimalizace obecně je zlepšení jednoho nebo více parametrů optimalizovaného problému. V této práci bude optimalizována směrovost antény ve směru osy trychtýře spolu s přizpůsobením, obojí na zadaném kmitočtu. Použita bude metoda roje částic (dále **PSO optimalizace** – *Particle Swarm Optimization*). Další použitelná metoda je genetický algoritmus (dále GA optimalizace), ale v této práci nebude dále zmiňována.

Druhá (úvodní) kapitola je věnovaná základnímu přehledu trychtýřových antén a to pro snazší orientaci v dalším textu.

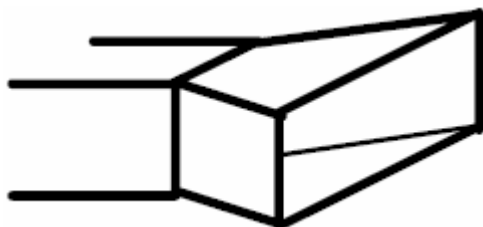
Třetí kapitola popisuje způsob, jakým lze vypočítat parametry a rozložení polí symetrické trychtýřové antény, známe-li její rozměry. V úvodu seznamuje s nejčastěji používanou metodou pro výpočet parametrů trychtýřových antén a jejich polí – s metodou konečných prvků. Následuje část věnovaná analýze vidů v napájecím vlnovodu trychtýřové antény. Vidy jsou vypočítávány dvěma metodami – analytickou a numerickou (program Comsol Multiphysics) a jsou navzájem porovnány. Následuje provedení výpočtů antény v režimu 2D osově souměrném a režimu kompletním trojrozměrném. Výsledky jsou navzájem porovnány, aby se zjistilo, jestli je 2D model dostačující pro další výpočty a optimalizaci, nebo zda je třeba tyto výpočty provádět s 3D modelem.

Čtvrtá kapitola je věnována optimalizaci antény na zadaném kmitočtu. Je uvedeno i pojednání o použité optimalizační metodě, konkrétně PSO optimalizaci. Dále je v této kapitole optimalizována rotačně symetrická trychtýřová anténa s lamelovou čočkou zařazenou za její aperturu

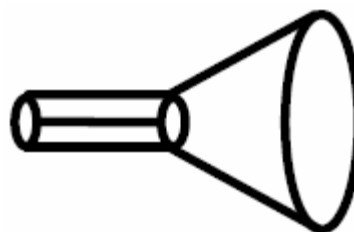
Pátá kapitola je věnována ověření dosažených výsledků v jiném programu, konkrétně v programu CST Microwave Studio založeném na **metodě konečných diferencí**.

## 2 Trychtýřová anténa (přehled použitých antén)

Existují různé typy trychtýřových antén lišící se konstrukčním provedením, které závisí na typu použitého vlnovodu nebo na kvalitě vyzařované vlny. Mezi hlavní představitele tohoto typu antén patří plochý a kuželový trychtýř (viz. obr. 2.1).



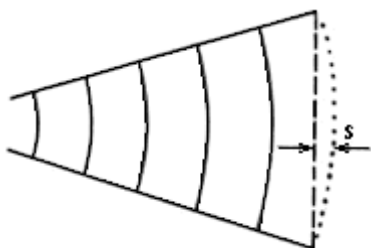
Obr. 2.1a) Plochý trychtýř [3].



Obr. 2.1b) Kuželový trychtýř [3].

Trychtýřová anténa je vlastně pouze rozšířené ústí vlnovodu. Rozložení intenzity  $E^{(s)}$  v ústí trychtýře se přibližně shoduje s rozložením ve vlnovodu, není to však z hlediska záření optimální. Aby nedošlo k nežádoucí deformaci hlavního laloku směrové charakteristiky, nesmí se trychtýř rozšiřovat příliš „zprudka“. To v praxi znamená, že trychtýř s přijatelnou délkou má poměrně malé ústí (několik vlnových délek), tudíž bude mít malý zisk a jeho charakteristika široký hlavní lalok. Lepší parametry vyžadují větší ústí a úměrně tomu i zvětšenou délku trychtýře, která je však většinou pro praxi neúnosná- až několik tisíc vlnových délek (viz. obr. 2.3) [3].

Proto se trychtýřové antény používají hlavně tam, kde jejich malý zisk postačí a uplatní se jejich konstrukční jednoduchost a tedy i nízká cena. Často se s nimi setkáme jako s primárními zářiči v ohnisku reflektorových antén.



Obr. 2.3 Vyzařování plochého trychtýře.

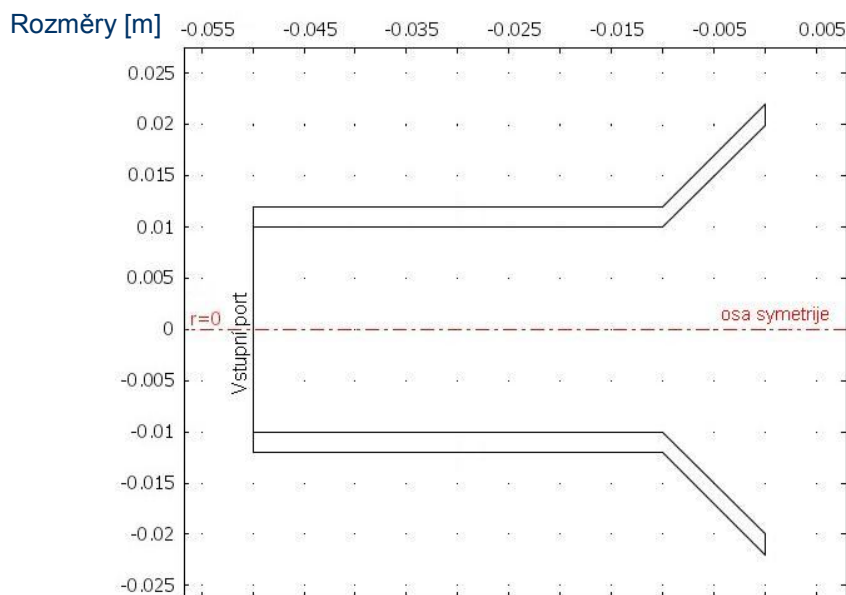
### 2.1 Trychtýřová anténa s kruhovým průřezem vlnovodu

Z analýzy elektromagnetického pole ve vlnovodu kruhového průřezu vyplývá, že zde může existovat nekonečně mnoho různých vidů TM a nekonečně mnoho různých vidů TE. Každý vid je charakterizován dvěma tzv. vidovými čísly  $m$ ,  $n$ , přičemž vidové číslo může být rovno nule ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) a vidové číslo  $n$  musí být od nule různé. Fyzikálním důvodem je opět skutečnost, že vidy se „zakázanými“ vidovými čísly nemohou vzniknout, neboť jejich pole by nesplňovalo okrajové podmínky na vodivém válcovém plášti vlnovodu.



Analýzu kruhového vlnovodu lze v programu Comsol Multiphysics provést pomocí osově symetrického modelu. Tato 2D metoda je nedokonalá, protože výpočty jsou prováděny pouze s kruhově symetrickými vidy, které ale nejsou základními.

Pro anténu simulovanou v této práci byl vybrán kruhový vlnovod o průměru 20 mm s délkou trychtýře 10 mm a průměrem rozevřené části trychtýře 40 mm. Testovaný kmitočet byl stanoven na  $f = 10$  až 40 GHz (viz. obr. 2.4).



Obr. 2.4: Rotačně symetrický návrh trychtýřové antény.

### 3 Způsob výpočtu parametrů antény

#### 3.1 Metoda konečných prvků

Předpokládejme, že vlnovod je vyroben z dokonalého elektrického vodiče, vyplněného dokonalým vzduchovým dielektrikem. Z Maxwellových rovnic vyplývá, že se vlnovodem šíří vlny příčně elektrické (*transversally electric*, TE) a vlny příčně magnetické (*transversally magnetic*, TM)

Rozložení vidů TE je jednoznačně určeno rozložením podélné složky intenzity magnetického pole  $H_z$  a rozložení vidů TM jednoznačně určuje rozložení podélné složky intenzity pole elektrického  $E_z$ .

Z první a druhé Maxwellovy rovnice vyplývá vlnová rovnice:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + (k_0^2 - \beta^2)E = 0 \quad (3.1)$$

kde  $\beta$  je fázová konstanta (konstanta šíření) vlny ve vlnovodu. Fázová konstanta udává, o kolik radiánů se změní fáze vlny na jednom metru vedení.  $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$  značí vlnové číslo ve volném prostoru – vakuu ( $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\epsilon_0$  je jeho permitivita).

Vztah 3.1 se jmenuje vlnová rovnice. Tato rovnice matematicky popisuje šíření elektromagnetické vlny ve směru podélné osy vlnovodu z. Parciální derivace intenzity pole v příčných směrech  $x$  a  $y$  vyjadřují skutečnost, že amplituda intenzity se v příčném průřezu vlnovodu mění. Je to dáno skládáním vln odražených od stěn vlnovodu a vznikem stojatého vlnění v příčném průřezu.

Vlnovou rovnici můžeme řešit pro dva různé problémy. V prvním případě se analyzuje na zadaném kmitočtu  $\omega$ . Vypočte se tedy vlnové číslo  $k_0$ . Jako neznámé zůstane rozložení pole v příčném průřezu  $E$  a konstanta šíření vlny  $\beta$ , kterou dosadíme. V druhém případě se analyzuje pro zadanou konstantu šíření  $\beta$ . Pokud se dosadí  $\beta=0$ , tak výsledkem budou kritická vlnová čísla (při kterých se vlna ještě vlnovodem nešíří) a příčné rozložení pole vidů, které se vlnovodem mohou šířit. Kritickým kmitočtem je frekvence, od níž vlna vlnovodem prochází. Pokud je kmitočet nižší než-li kritický, odráží se energie elektromagnetické vlny zpět ke zdroji.

Základní postup pro výpočet rozložení intenzity elektrického pole pomocí metody konečných prvků lze shrnout do několika kroků: Profil řešeného prostoru se rozdělí na konečné prvky, u dvojrozměrného problému se často používají trojúhelníky. Každý trojúhelník je konečný prvek, vrcholy trojúhelníku nazýváme uzly. Rozlišuje se přitom mezi uzly lokálními (číslováno je pro každý konečný prvek zvlášť) a mezi uzly globálními (společné vrcholy trojúhelníků- viz. obr. 3.7).

Rozložení podélné složky intenzity elektrického pole se *formálně* aproximuje nad každým konečným prvkem lineární, kvadratickou nebo kubickou funkcí. Součtem aproximací nad všemi konečnými prvky, na něž je průřez vlnovodu rozdělen, získáme rozložení pole v celém průřezu vlnovodu.

$$e(x, y) = \sum_{m=1}^M E_m N_m(x, y) . \quad (3.2)$$

Ve vztahu 3.2 je  $E_m$  prozatím neznámá hodnota podélné složky intenzity pole v  $m$ -tém uzlu a  $N_m$  je známá bázová funkce. V případě lineární aproximace se jedná o jehlan, který nabývá jednotkové hodnoty v uzlu  $m$  a hodnoty nulové ve všech ostatních uzlech.

Formální aproximaci dosadíme do výchozího vztahu. Jelikož aproximace díky své přibližnosti nesplňuje řešenou rovnici zcela přesně, musíme k našemu vztahu přičíst chybovou funkci (tzv. reziduum). Čím menší je reziduum, tím přesnější je aproximace.

$$\frac{\partial^2 e(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e(x, y)}{\partial y^2} + k_0^2 e(x, y) = R(x, y) . \quad (3.3)$$

Reziduum se minimalizuje metodou vážených reziduí. Tato metoda spočívá v postupném vynásobení rezidua vhodnými váhovými funkcemi a v integrování tohoto součinu přes celý profil analyzovaného vlnovodu. Zvolí-li se za váhové funkce bázové funkce všech uzlů, v nichž se nezná hodnota intenzity, dostaneme  $M$  rovnic pro  $M$  neznámých.

$$\int_0^B \int_0^A R(x, y) N_m(x, y) dx dy = 0, \quad m = 1, 2, \dots, M . \quad (3.4)$$

Popsaná volba váhových funkcí je nazývána Galerkinovou metodou. Ve vztahu 3.4 značí  $A$  šířku vlnovodu a  $B$  je výška vlnovodu (integruje se přes celý příčný průřez). Do vztahu 3.4 se dosadí za reziduum levá strana vztahu 3.3, přičemž aproximace pole  $e(x, y)$  je brána ze vztahu 3.2. Postupným dosazením  $M$  bázových funkcí do vztahu 3.4 dostaneme soustavu  $M$  lineárních rovnic pro  $M$  neznámých uzlových hodnot intenzity  $E_m$ . Jelikož integrály a derivace bázových funkcí se může vyčíslit, vzniknou z nich známé reálné koeficienty.

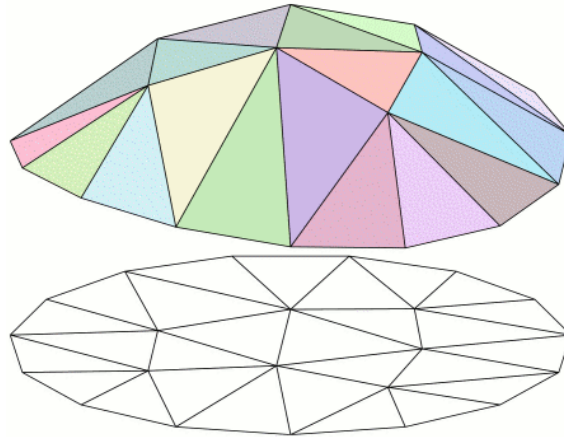
Dále vyřešíme maticovou rovnici, kterou dostaneme jako výsledek Galerkinovy metody (vztah 3.5), kde  $E$  (viz. 3.6) je sloupcový vektor neznámých uzlových hodnot pole.

$$SE + k_0^2 TE = 0 \quad (3.5)$$

$$E = [E_1 \quad E_2 \quad \dots \quad E_M]^T \quad (3.6)$$

Maticová rovnice (3.5) je tzv. zobecněný problém vlastních čísel. Výsledkem jejího řešení je vektor vlastních čísel (vektor kvadrátů kritických vlnových čísel jednotlivých vidů) a matice vlastních vektorů (sloupce odpovídají uzlovým hodnotám podélných složek intenzit jednotlivých vidů).

Dosazením uzlových hodnot do formální aproximace získáme aproximační funkci hledané podélné složky intenzity v každém bodu profilu analyzovaného vlnovodu. Z podélné složky intenzity může vypočítat všechny ostatní složky vektorů intenzity elektrického i magnetického pole. Více v literatuře [2] a [6].



Obr. 3.7 Patnáctistěnná mnohoúhelníková oblast  $\Omega$  umístěná v rovině (vespod), a po částech lineární funkce (nahore) tohoto mnohoúhelníku [6].

### 3.2 Vidy šířící se vlnovodem průměru 20 mm

V úvodu je třeba se seznámit s vidy, které se šíří napájecím vlnovodem kruhového průřezu pro optimalizovanou trychtýřovou anténu. Trychtýřová anténa je v této práci zkoumána s ohledem na to, že se v ní šíří pouze transversálně elektrická vlna (dále vid TE), což odpovídá simulaci z Comsolu.

Analýzou elektromagnetického pole ve vlnovodu kruhového průřezu lze zjistit, že zde může existovat nekonečně mnoho různých vidů TM a nekonečně mnoho různých vidů TE. Každý vid je charakterizován dvěma tzv. vidovými čísly  $m$ ,  $n$ , přičemž vidové číslo  $m$  může být rovno nule ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) a vidové číslo  $n$  musí být od nuly různé. Vidy se „zakázanými“ vidovými čísly nemohou vzniknout, neboť jejich pole by nesplňovalo okrajové podmínky na vodivém válcovém plášti vlnovodu.

Mezní vlnové délky  $\lambda_m^{TE}$  a mezní frekvence  $f_m^{TE}$  ve vlnovodu lze buďto vypočítat v programu Comsol Multiphysics (pomocí metody konečných prvků), nebo analyticky. Při analytickém výpočtu je potřeba znát u vidů TM kořeny Besselovy funkce prvního druhu  $m$ -tého řádu. Analytický výpočet by měl být přesnější.

Podle [2] platí, že:

$$f_m^{TE} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot \frac{\alpha'_{mn}}{a} \quad (3.8)$$

$$\lambda_m^{TE} = \frac{2\pi a}{\alpha'_{mn}} \quad (3.9)$$

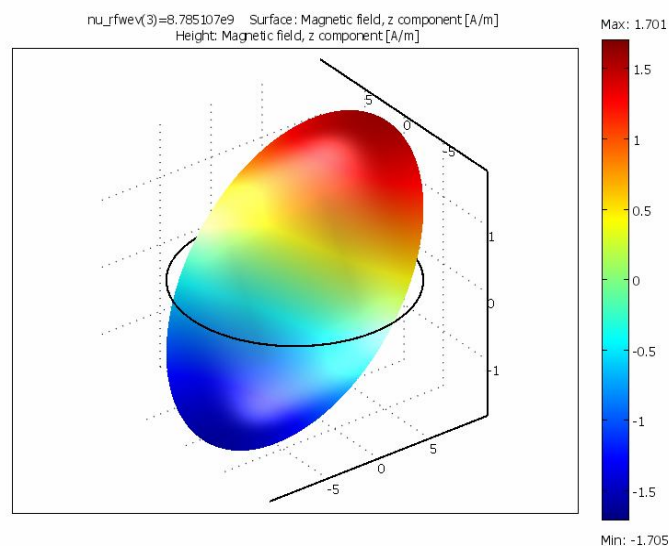
kde  $a$  je poloměr vlnovodu a  $\alpha'_{mn}$  vyjadřuje hodnotu  $n$ -tého kořene derivace Besselovy funkce 1. druhu  $m$ -tého řádu. Tyto kořeny, mezní vlnové délky a mezní frekvence pro jednotlivé vidy jsou pro anténu řešenou touto prací vypočteny a shrnuty do následujících tabulek:

a)			b)			c)		
	$\alpha'_{mn}$		TE <sub>mn</sub>	$\lambda_m$ [mm]		TE <sub>mn</sub>	$f_m$ [GHz]	
	n=1	n=2		n=1	n=2		n=1	n=2
m=0	3,8317	7,0156	m=0	16,4	8,96	m=0	18,295	33,497
m=1	1,8412	5,3314	m=1	34,13	11,79	m=1	8,791	25,456
m=2	3,0542	6,7061	m=2	20,57	9,37	m=2	14,583	32,019
m=3	4,2012	8,0152	m=3	14,96	7,84	m=3	20,059	38,27
m=4	5,3176	9,2824	m=4	11,82	6,77	m=4	25,389	44,32
m=5	6,4156	10,52	m=5	9,79	5,97	m=5	30,632	50,229

Tab. 3.10a) Kořeny derivace Besselovy funkce prvního řádu, b) mezní vlnové délky, c) mezní frekvence.

Kořeny Besselových funkcí byly vypočítány pomocí programu vytvořeného v aplikaci MATLAB. Ten umožňuje jejich zobrazení po zadání řádu Besselovy funkce a počtu kořenů. Jeho zdrojový kód je uveden v příloze. Pro názornou ukázkou je níže uvedeno pět základních TE vidů.

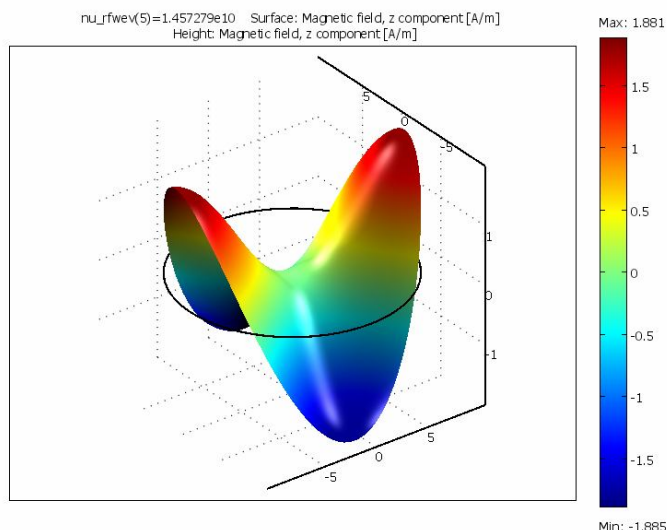
Pomineme-li nultý vid, kdy se při nulové frekvenci nic nešíří, je první frekvencí kdy se vlnovodem začala šířit TE vlna  $f_m = 8,785$  GHz – vid TE<sub>11</sub> analyticky  $f_m = 8,791$  GHz. Rozdíl je způsoben nepřesností numerického výpočtu v programu Comsol (viz. Obr. 3.11).



Obr. 3.11 Rozložení amplitudy intenzity elektrického pole vidu TE<sub>11</sub>.

Jak je z obrázku 3.11 vidět, tento vid není rotačně symetrický, takže pro účely vyzařování kruhově polarizované vlny a její simulace v 2D rotačně symetrickém modelu není použitelný.

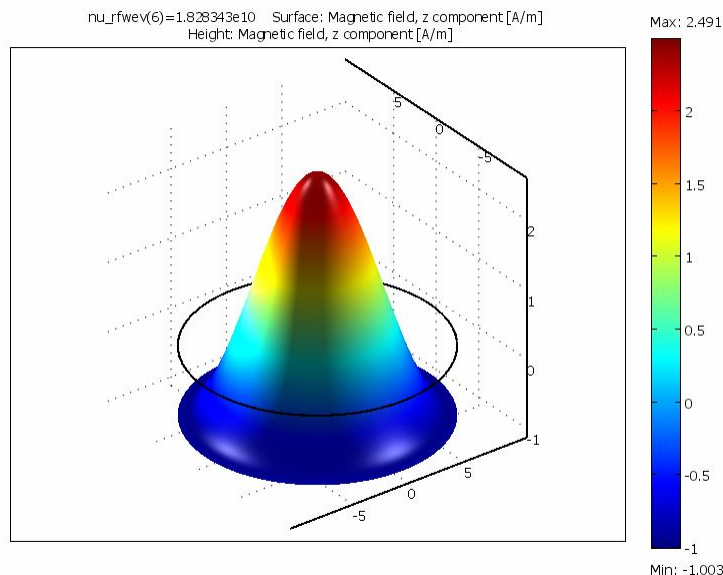
V pořadí druhý vid který se bude šířit tímto vlnovodem je vid TE<sub>21</sub> na frekvenci  $f_m = 14,57$  GHz, analyticky  $f_m = 14.58$  GHz (viz. Obr. 3.12).



Obr. 3.12 Rozložení amplitudy intenzity elektrického pole vidu  $TE_{21}$ .

Kdybychom budili vlnovod takovým způsobem aby vznikaly všechny vidy TE, tak tento vid omezí pásmo jednovidovosti simulovaného napájecího vlnovodu na pásmo 8,785 až 14,57 GHz.

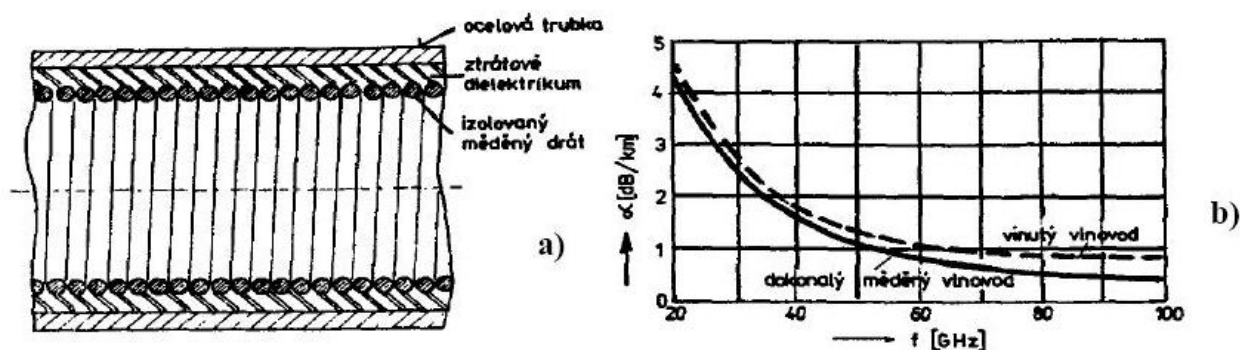
Třetím videm který se bude vlnovodem šířit je první rotačně symetrický vid  $TE_{01}$  na frekvenci  $f_m = 18,28$  GHz, analyticky  $f_m = 18,295$  GHz (viz. Obr. 3.13).



Obr. 3.13 Rozložení amplitudy intenzity elektrického pole vidu  $TE_{01}$ .

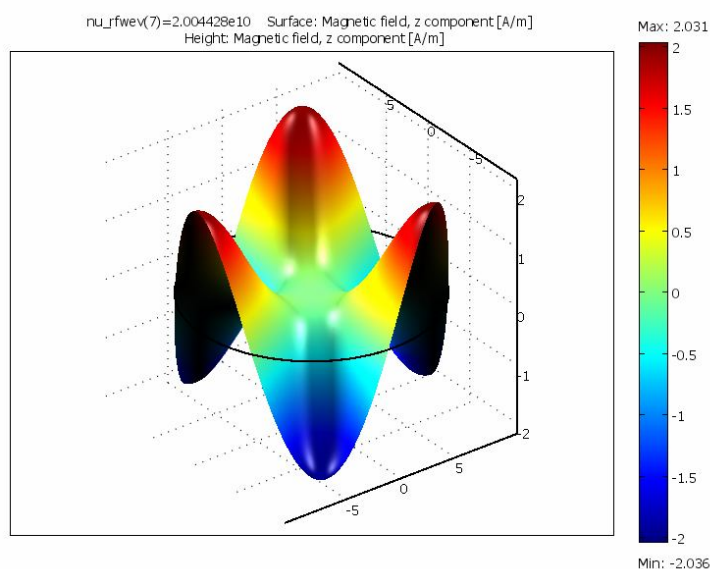
Že se jedná o vid rotačně symetrický kolem osy, lze poznat jak z obrázku 3.13, tak ze zápisu  $TE_{mn}$ , kdy u rotačně symetrických vidů je  $m$  rovno nule. Tento vid je potřeba, když chceme na konec vlnovodu připojit trychtýřovou anténu, která vyzařuje kruhově polarizovanou vlnu. Tento vid je dále výhodný, protože se stoupající frekvencí klesá jeho měrný útlum. Ale je obtížné zbavit se všech ostatních vidů, které

tuto vlastnost znemožňují. Jednou z variant realizace je, že se vlnovod utvoří z navinutého měděného drátu (závit vedle závit) s izolační vrstvou. Jeho vzhled a útlumová charakteristika jsou na obrázku 3.14.



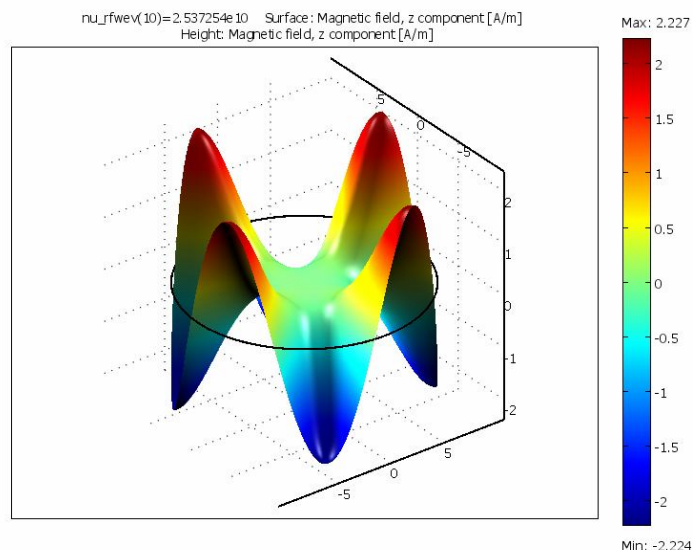
Obr. 3.14a) Konstrukce vinutého vlnovodu, b) jeho útlumové charakteristiky [4].

Čtvrtý je to pak vid  $TE_{31}$  na frekvenci  $f_m = 20,04$  GHz, analyticky  $f_m = 20,06$  GHz (viz. obr. 3.15).



Obr. 3.15 Rozložení amplitudy intenzity elektrického pole vidu  $TE_{31}$ .

Pátý vid  $TE_{41}$  je na frekvenci  $f_m = 25,37$  GHz, analyticky  $f_m = 25,39$  GHz (viz. obr. 3.16).



Obr. 3.16 Rozložení amplitudy intenzity elektrického pole vidu  $TE_{41}$ .

Následující tabulka shrnuje jaké vidy se budou dále šířit a kdy se objeví další rotačně symetrický vid.

Vid	$TE_{11}$	$TE_{21}$	$TE_{01}$	$TE_{31}$	$TE_{41}$	$TE_{12}$	$TE_{51}$	$TE_{22}$	$TE_{02}$	$TE_{61}$	$TE_{32}$
$f_m$ analyticky [GHz]	8,791	14,58	18,30	20,06	25,39	25,46	30,63	32,02	33,50	35,82	38,27
$f_m$ numericky [GHz]	8,785	14,57	18,28	20,04	25,37	25,44	30,61	32,00	33,47	35,79	38,24

Tab. 3.17 Tabulka shrnující mezní frekvence prvních jedenácti vidů v navrženém vlnovodu.

Dále ještě lze za pomoci tabulky 3.17 určit pásmo jednovidovosti daného vlnovodu a to je  $TE_{21} - TE_{11} = (14,58 - 8,791) \cdot 10^9 = 5,789 \text{ GHz}$ .

### 3.3 Sestrojení trychtýřové antény v programu Cmsol

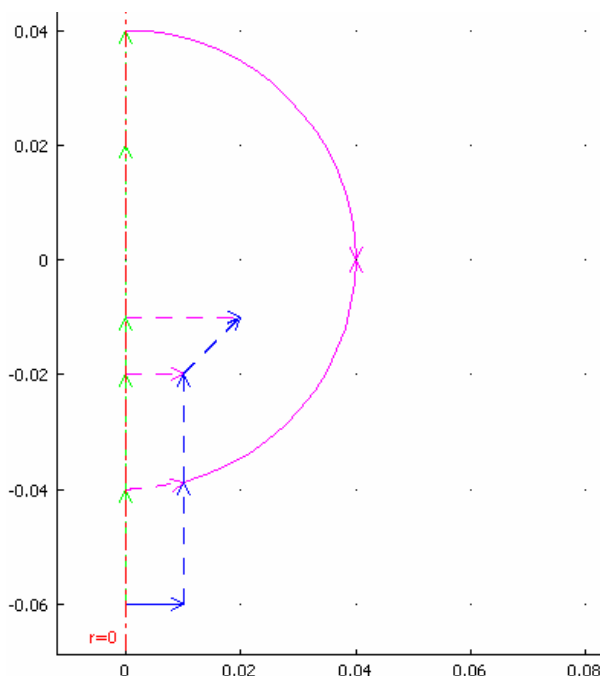
#### 3.3.1 Sestrojení trychtýřové antény ve 2D

Prvním krokem je sestrojení geometrie s následujícími rozměry:

- poloměr napájecího vlnovodu .....  $r = 10 \text{ mm}$
- délka napájecího vlnovodu .....  $l = 40 \text{ mm}$
- poloměr širší části trychtýře .....  $r_t = 20 \text{ mm}$
- délka trychtýře .....  $l_t = 10 \text{ mm}$
- poloměr bubliny dokonale pohlcující stěny .....  $r_b = 40 \text{ mm}$



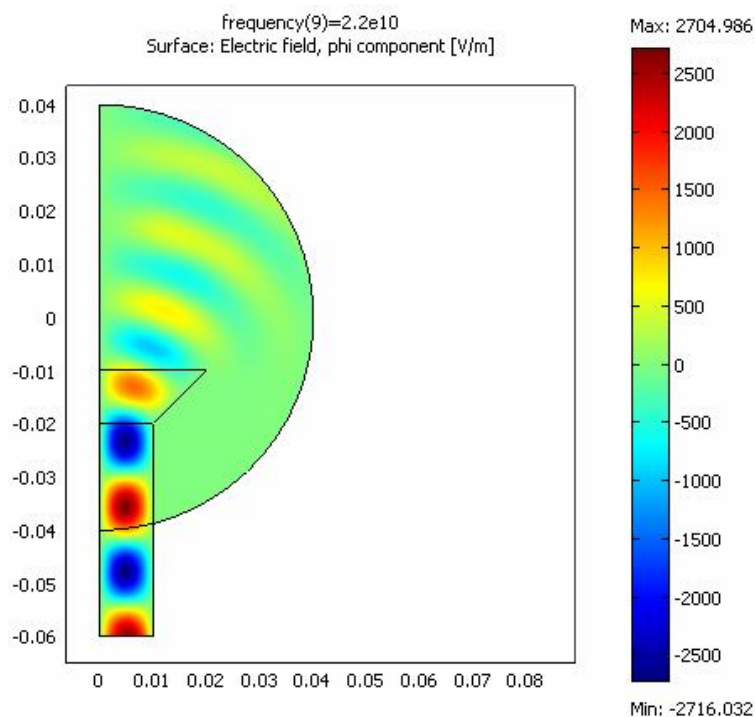
Dalším krokem je zadání typu okrajových podmínek na hranicích. Comsol Multiphysics jednotlivé druhy okrajových podmínek od sebe barevně rozliší (viz. obr.3.18).



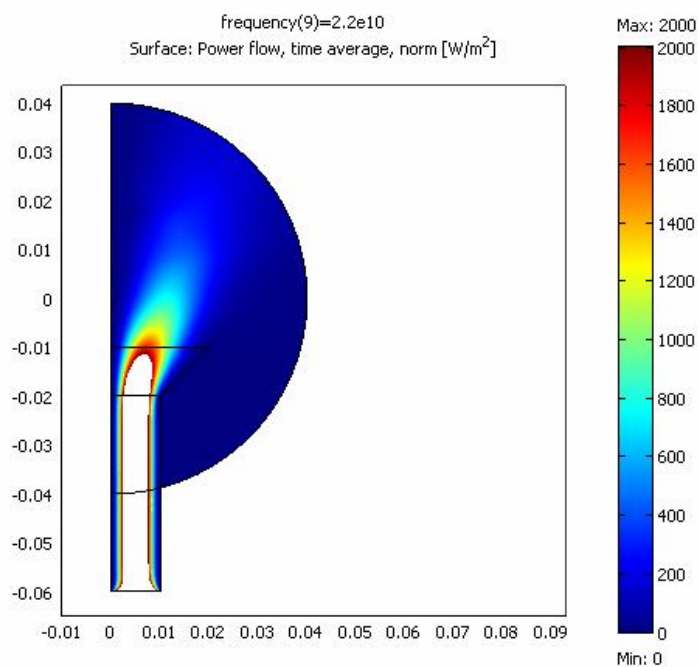
Obr. 3.18 Návrh trychtýřové antény pomocí osové souměrnosti. Zelená – osa symetrie, modrá přerušovaná – dokonalý elektrický vodič, modrá – vstupní port, fialová přerušovaná – neexistující stěny, fialová – dokonale pohlcující stěna.

Dále je důležité nastavení buzení v modelu, neboli okrajové podmínky portu v obrázku 3.18. Ten je v návrhu nastaven na počáteční velikost intenzity elektrického pole na portu  $E_{0\varphi} = 1 \text{ V/M}$ .

Posledním krokem je vygenerování sítě konečných prvků a výpočet řešení. Výsledek výpočtu je znázorněn na obrázcích 3.19 a 3.20.

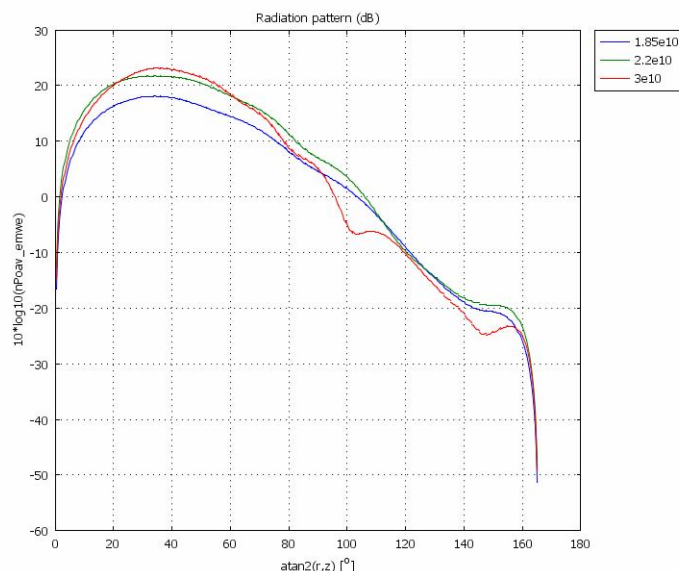


Obr. 3.19 Rozložení elektromagnetického pole uvnitř a vně analyzovaného kuželového trychtýře (zobrazena axiální složka intenzity elektrického pole).



Obr. 3.20 Rozložení celkového výkonu pole uvnitř a vně analyzovaného kuželového trychtýře.

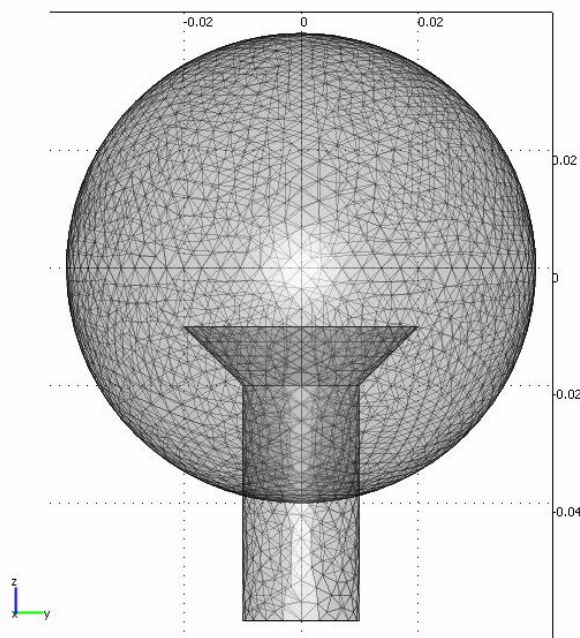
V tomto rotačně symetrickém modelu je pomocí nástroje na tvorbu grafů vygenerován graf směrové vyzařovací charakteristiky (viz. obr. 3.21).



Obr. 3.21 Vyzařovací charakteristika trychtýřové antény při třech různých frekvencích buzení – 18,5 GHz (modrá), 22 GHz (zelená) a 30 GHz (červená).

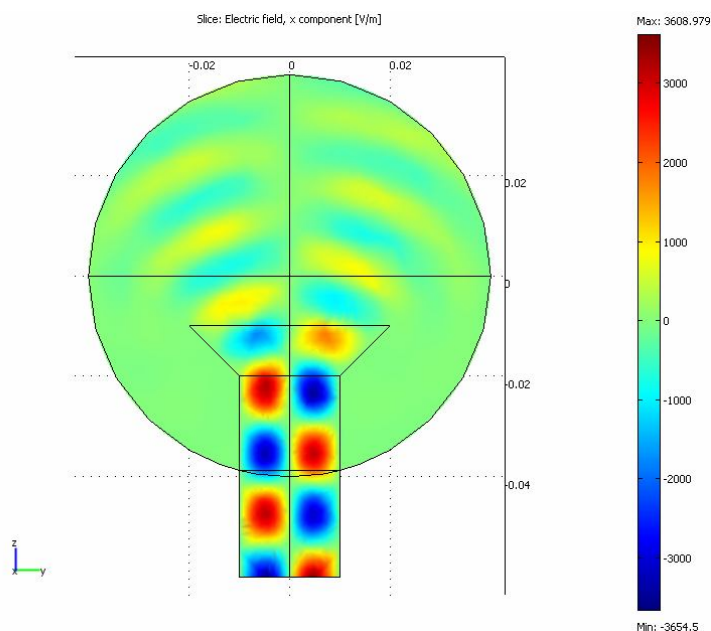
### 3.3.2 Sestrojení trychtýřové antény ve 3D

Navrhování a simulace trychtýřové antény ve 3D je podobné jako u 2D modelu. Opět se nejprve graficky vytvoří trychtýř s napájecím vlnovodem a ten se obalí bublinou z dokonale pohlcujícího (neexistujícího) materiálu, označí se vstup vlnovodu jako port, ten se nastaví tak, aby na něm vznikala kruhově polarizovaná vlna, zavedou se okrajové podmínky, zadá se vytvoření sítě konečných prvků a spustí se simulace (viz. obr. 3.22).

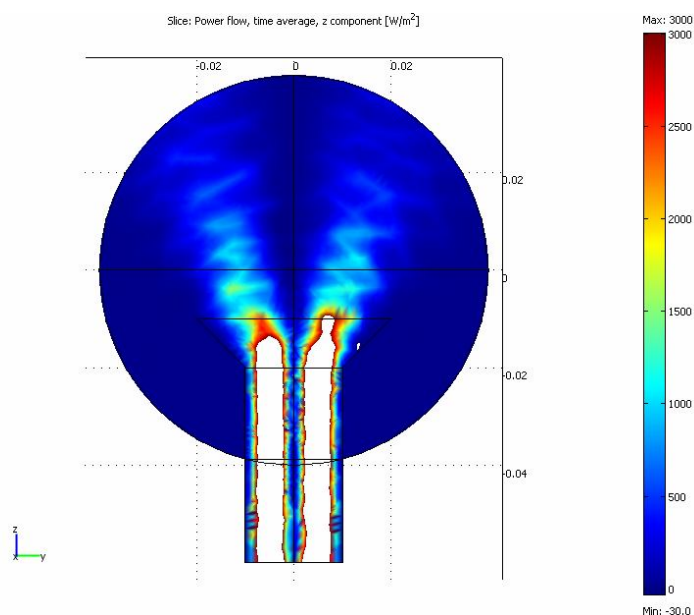


Obr. 3.22 Návrh trychtýřové antény za pomoci 3D modelu, viditelná síť konečných prvků

Na obrázcích 3.23 a 3.24 je znázorněno porovnání výsledků rozložení elektromagnetického pole ze simulací v 2D modelu - výsledek je shodný, elektrická složka pole tvoří „prstence“ kolem osy symetrie- kolem této osy má elektrické pole opačný směr.

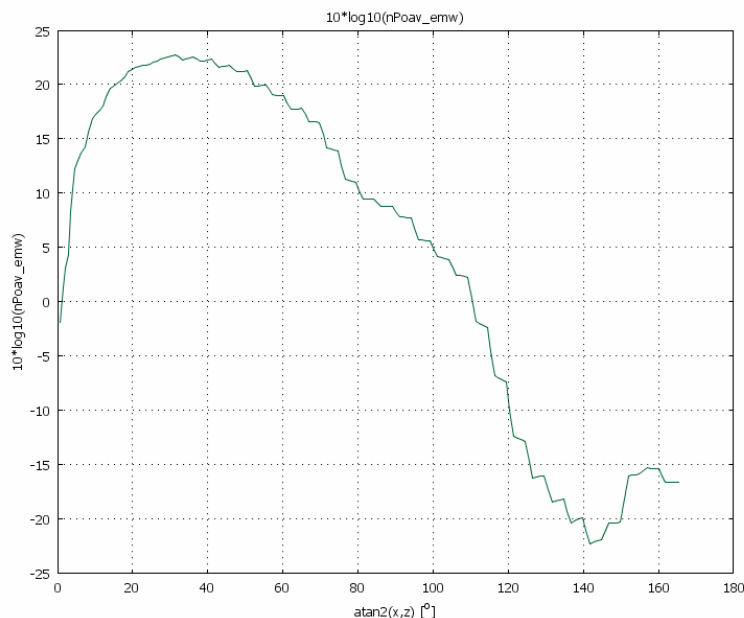


Obr. 3.23 Rozložení elektrického pole uvnitř a vně analyzovaného kuželového trychtýře 3D, zobrazena složka intenzity elektrického pole, která je kolmá k rovině papíru.



Obr.3.24: rozložení celkového časově průměrovaného absolutního výkonu pole uvnitř a vně analyzovaného kuželového trychtýře.

Rozložení celkového časově průměrovaného absolutního výkonu ve vzdálenosti 40 cm od antény (viz. obr. 3.25).



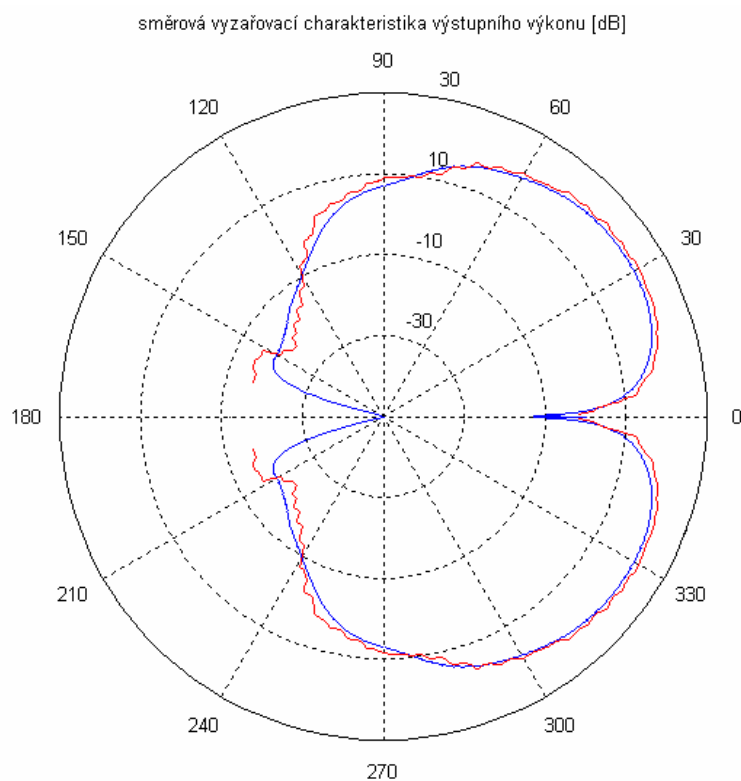
Obr. 3.25 Vyzařovací charakteristika trychtýřové antény 3D při frekvenci buzení 22 GHz.

### 3.4 Porovnání 2D a 3D modelu

Jedná se o porovnání vyzařovacích charakteristik na základě výstupního grafu (viz. obr.3.26). Model simulovaný jako 2D má větší útlum v ose antény a to právě díky nedokonalosti simulace 2D, protože rotačně symetrický vid má uprostřed vlnovodu nulovou velikost elektrického pole (ve skutečnosti přesně nulové není).

U 3D simulace jsou výsledky zatíženy větší nepřesností - to má za následek méně přesné výpočty pro daleko více konečných prvků a výpočetní a časovou náročnost. Tento projev je zachycen na obrázku 3.26, kdy menší počet bodů na okraji dokonale pohlcojící bubliny v návrhu způsobí větší chybu výpočtu a tím „zuby“ na vyzařovací charakteristice.

Z grafu na obrázku 3.26 je vidět, že můžeme s výhodou osově symetrický 2D model použít pro výpočet rotačně symetrické trychtýřové antény aniž bychom se dopustili chyby ve výpočtu. Tato skutečnost bude dále využívána.



Obr. 3.26 Vyzařovací charakteristiky stejné simulované antény, rozdíl pouze v metodě simulace: modrá - simulována rotačně symetrická část antény v 2D simulaci, červená - simulováno jako skutečná trojrozměrná anténa.

## 4 Optimalizace antény

### 4.1 PSO optimalizace

Optimalizace PSO je vhodná pro použití u složitých mnohorozměrných nesouvislých úloh v různých polích. Byla vyvinuta v roce 1995 Kennedym a Eberhartem [5]. Nejsnáze lze pochopit funkci PSO při analogii s rojem včel. Jejich cíl je určit polohu bodu s největší koncentrací květin. Bez předešlé znalosti pole, včely začnou náhodně prohledávat a lokalizovat náhodnou rychlostí květiny. Každá včela si může pamatovat umístění ve kterém našla nejvíce květin, a ví i místo, kde ostatní včely našly nejvíce květin.

Rozhodování každé včely o tom, zda bude prohledávat dál okolí svého maxima koncentrace květin nebo poletí-li hledat největší koncentraci na místo kolem polohy, kde našel největší koncentraci květin roj. Závisí buďto na jejím zvyku nebo na postavení vévodící včely v roji. Brzy ale začnou všechny létat na místo s největší koncentrací květin.

#### 4.1.1 Termíny používané v PSO

**Jedinec:** každý roj se skládá z řady jedinců. Každý jedinec (včela) se chová samostatně se stejnými principy rozhodování. Každý jedinec je možné řešení problému.

**Pozice:** v analogii s *pozicí* umístění včely v poli. To je reprezentováno souřadnicemi v x-y souřadnicích. My ale můžeme poskytnout n-rozměrný prostor. Tento n-rozměrný prostor je řešený prostor.

**Hodnota kritériální funkce:** její velikost je úměrná kvalitě dosažených výsledků (jako je minimální vyzařovací úhel, minimální činitel odrazu atd) vzhledem k pozici jedince. V analogii k včelám je to velikost koncentrace květin.

**Pbest:** v analogii k včelám je to osobní maximum včely v koncentraci květin. Každou další koncentraci porovnává s *pbest*, je-li větší, přepíše *pbest* na aktuální polohu.

**Gbest:** každý jedinec/včela má svoje největší *pbest*. Z nich se vybere to s největší hodnotou kritériální funkce a prohlásí se za *gbest*.

#### 4.1.2 Postup při výpočtu optimalizace za pomoci PSO.

##### 1. Definice řešeného prostoru

První krok při řešení optimalizace za pomoci PSO algoritmu je určení počtu rozměrů řešeného prostoru, odpovídající počtu parametrů, které bude PSO algoritmus optimalizovat a u každého z nich určit minimální a maximální hodnoty ( $x_{\max}$  a  $x_{\min}$ ). Mimo tyto hranice se maximum v kritériální funkci nevyskytne nebo to nedovolují jiné podmínky např. výrobní.

## 2. Definice kritériální funkce

Tento krok provádí spojení mezi optimalizačním algoritmem a skutečným počítačovým modelem. Znamená to, že z naší optimalizované pozice v  $n$ -rozměrném prostoru možných řešení zjistíme, jak je pro nás tato pozice ideální, neboli rovnice která nám z pozice jedince vypočítá její kritériální funkci umístění.

## 3. Vytvoření náhodného pozice a rychlosti

Na začátku hledání musíme všem jedincům samostatně určit náhodné místo v řešeném prostoru a náhodný směr i velikost rychlosti, pouze omezenou zvolenou maximální velikostí rychlosti. Každá pozice těchto částecek je zároveň její  $pbest$  a mezi těmito pozicemi je i vybráno první  $gbest$ .

## 4. Let částecek po řešeném prostoru

Každý jedinec se musí pohybovat po řešeném prostoru tak jako včela v roji. Algoritmus úkonů pro každého jedince pohybujícího se řešeným prostorem je stejný u všech ale pro každého jedince se řeší samostatně.

## 5. Hodnotit kritériální funkci

Kritériální funkce řídí jedince v řešeném prostoru a vrací hodnotu kritériální funkce v každé momentální poloze. Jestliže je tato hodnota lepší než hodnota vlastní  $pbest$  pro samotného jedince, nebo celkové  $gbest$ , je tato hodnota přepsána aktuální pozicí.

## 6. Aktualizace rychlosti částecčky

Manipulace s velikostí a směrem rychlosti jedinců je jádro PSO optimalizace. Existují dva typy rovnic které tuto skutečnost umožňují:

Lineární změna parametru:

$$v_n = w \cdot v_n + c_1 \text{rand}() \cdot (p_{best,n} - x_n) + c_2 \text{rand}() \cdot (g_{best,n} - x_n) \quad (4.1)$$

kde se podle [5] parametr  $w$  (hmotnost) mění lineárně během celé optimalizace z 0,9 na 0,4. Funkce  $\text{rand}()$  vrací náhodné číslo v rozmezí 0 až 1 a hodně důležitá je volba konstant  $c_1$  a  $c_2$ , které určují jak moc bude částecčka přitahována ke globálnímu nebo lokálnímu maximu. V literatuře [5] se navrhuje jako optimální volba oba parametry nastavit na hodnotu 1,494.

Dále se používá originální stanovení parametrů v rovnici:

$$v_n = K(v_n + \varphi_1 \text{rand}() \cdot (p_{best,n} - x_n) + \varphi_2 \text{rand}() \cdot (g_{best,n} - x_n)) \quad (4.2)$$

kde  $K$  je faktor zúžení. Podle [5] se jeví jako optimální hodnota  $\varphi=4,01$ . Z ní se pak stanoví  $K$  na hodnotu  $K=0,729$ . Standardně se  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  volí 2,05, ale optimální volba podle [5] by měla být  $\varphi_1=2,8$  a  $\varphi_2=1,3$ .

## 7. Opakování

Tento postup od systematického letu částecek se opakuje pro všechny jedince tolikrát, kolikrát je to potřebné pro dosažení optimální přesnosti.



## 8. Přemísťování částech

Jakmile známe hodnotu rychlosti, je jednoduché posunout jedince na další polohu. Nová souřadnice  $x_n$  je vypočítána pro každou z  $n$ -rozměrů následující rovnicí:

$$x_n = x_n + \Delta t * v_v. \quad (4.3)$$

### 4.1.3 Okrajové podmínky.

Okrajové podmínky jsou použity v okamžiku, kdy během výpočtů zjistíme, že momentální jedinec v některém z rozměrů překročil jeho minimální nebo maximální povolenou velikost. Základní typy stěn jsou tři :

**Absorpční:** jedinec, který vyletí za danou minimální nebo maximální hranici je posunut zpět na tuto hranici a jeho rychlost v tomto rozměru je nastavena na nulu.

**Odrážná:** jedinec, který vyletí za danou minimální nebo maximální hranici je posunut o úsek, o který v daném rozměru překročil hranici, zpět do řešeného prostoru a jeho rychlosti v tomto rozměru obrátíme znaménko.

**Neviditelná:** jedinec, který vyletí za danou minimální nebo maximální hranici je vymazán a dále se s ním už nepočítá.

## 4.2 Použitý PSO algoritmus

Algoritmus použitý na optimalizaci rotačně symetrické a antény je použit z předchozí části (4.1). Na jeho začátku je možno si zvolit typ okrajové podmínky. Poté proběhnou všechny inicializace, i ty do kterých si uživatel musí zapsat hodnoty pro každou rozdílnou trychtýřovou anténu zvlášť. Po těchto inicializacích začíná jako první cyklus iterací a v něm probíhá vnořený cyklus jedinců.

V cyklu jedinců se nejprve zjistí zda-li je jedinec aktivní (to v případě, že jsou použité neviditelné stěny). Poté se na obrazovku vypíše v % údaj o kompletnosti výpočtu PSO optimalizace. Dále je vypočítána kritériální funkce, což v praxi znamená dosazení momentálních rozměrů antény z kterých je vypočítána hodnota kritériální funkce.

Dále se zjistí, zda je tato hodnota kritériální funkce lepší než jeho *pbest* nebo *gbest*. Poté se aktualizuje rychlost jedince podle rovnice (4.1) nebo (4.2), dopočítá se momentální poloha jedince a zjistí se kterou okrajovou stěnu si uživatel vybral a podle ní se případně dokoriguje rychlost a poloha jedince. V případě neviditelné stěny je možné, že se při překročení některé okrajové podmínky konkrétní jedinec přímo zruší.

Algoritmus PSO použitý v optimalizaci trychtýřové antény a samotný program jako M-file pro program Matlab jsou uvedeny v příloze.

### 4.3 Výsledky optimalizace

Zjišťování kvality použité PSO optimalizace bylo zkoušeno na rotačně symetrické trychtýřové anténě, kde byly jako optimalizované části použity všechny rozměry této jednoduché antény. Byly to vnitřní průměr napájecího vlnovodu, vnitřní průměr apertury této antény, délka napájecího vlnovodu a délka trychtýřové části. Tato anténa byla optimalizovaná na zvolenou frekvenci 9 GHz. Jako sledované parametry pro kritériální funkci byly zvoleny: maximální výkon v hlavním laloku vztažený k  $m^2$  -  $P_{1,max}$  [ $W/m^2$ ], impedanční přizpůsobení (parametr  $s_{11}$ ), šířka hlavního laloku a dosažení směrovosti ve směru osy trychtýře.

Kritériální funkce:

$$Ideal = \frac{100}{\frac{100}{P_{1,max}} + \text{úhel vyzařování} + \text{šířka laloku} + 1000 \cdot |s_{11}|} \quad (4.4)$$

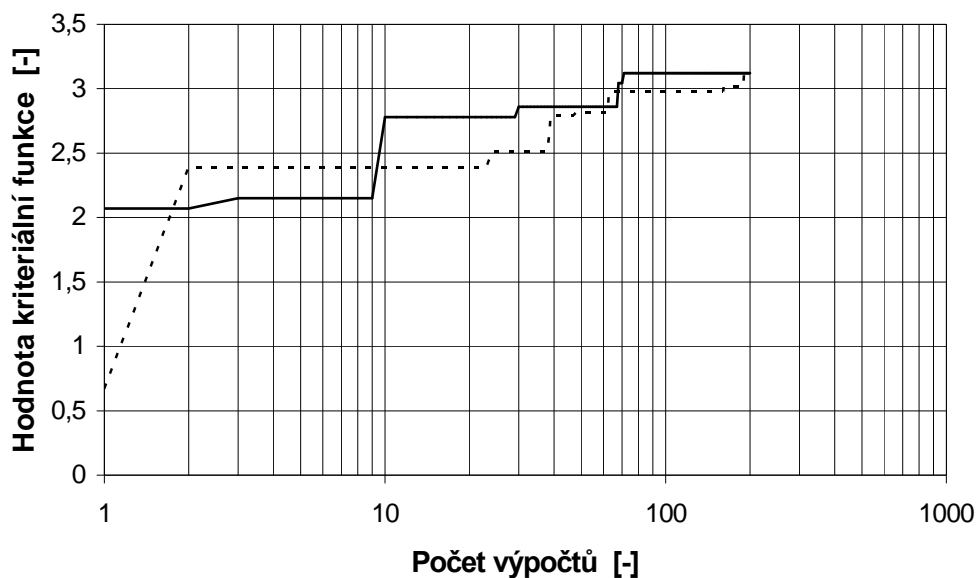
Optimalizováno bylo pro maximální hodnotu kritériální funkce. Konstanty v kritériální funkci byly voleny vzhledem k výsledkům optimalizací tak, aby měly všechny parametry přibližně stejnou váhu. Konstanta nad hlavní zlomkovou čarou je zvolena jen pro lepší orientaci ve výsledku.

#### 4.3.1 Porovnání dvou různých rovnic pro aktualizaci částečky v PSO optimalizaci pro jednoduchou trychtýřovou anténu

Pomocí optimalizace při použití první rovnice (4.1) s lineárně klesající vahou a druhé rovnice (4.2) s originálním nastavením parametrů (parametry pro oba typy rovnic nastaveny podle kapitoly 4.1.2), se simulovaly dlouhé a krátké optimalizace s cílem zjistit efektivitu obou variant.

Následující graf (obr. 4.1) porovnává vývoje maximální hodnoty kritériální funkce krátkých optimalizací (200 výpočtů) pro dvě různé rovnice aktualizace rychlosti jedinců. Jde o typický průběh krátkých optimalizací u každého typu rovnic.

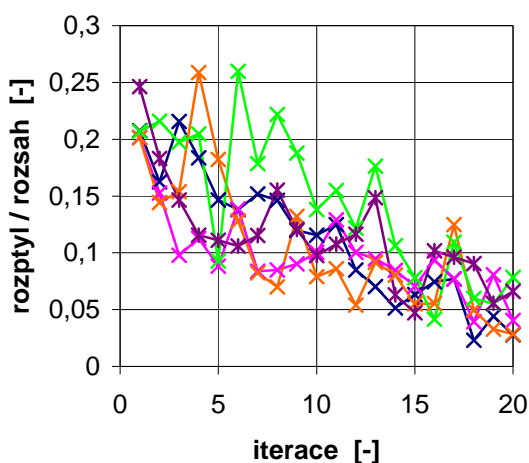
### Porovnání hodnot kritériálních funkcí u dvou typů rovnic aktualizací rychlosti jedinců



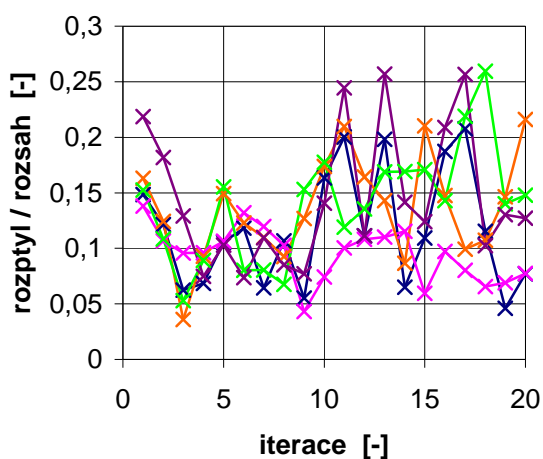
Obr. 4.1 Průběh maximální hodnoty kritériální funkce na počtu výpočtů v PSO optimalizaci u malého počtu výpočtů (200) optimalizováno na maximální hodnotu kritériální funkce, plná čára – lineárně klesající váha, přerušovaná čára – originální.

Dále je v práci rozebráno jak se chovají jedinci, kteří jsou vedeni těmito dvěma rovnicemi. Za prvé jejich samostatnost (jak jsou vedeni k celkovému maximu nebo jestli se více soustřeďují na vlastní výsledky) a vlastní prohledávání v řešeném prostoru. K tomu bude sloužit empirický rozptyl normovaný na velikost rozsahu:

#### Lineárně klesající váha



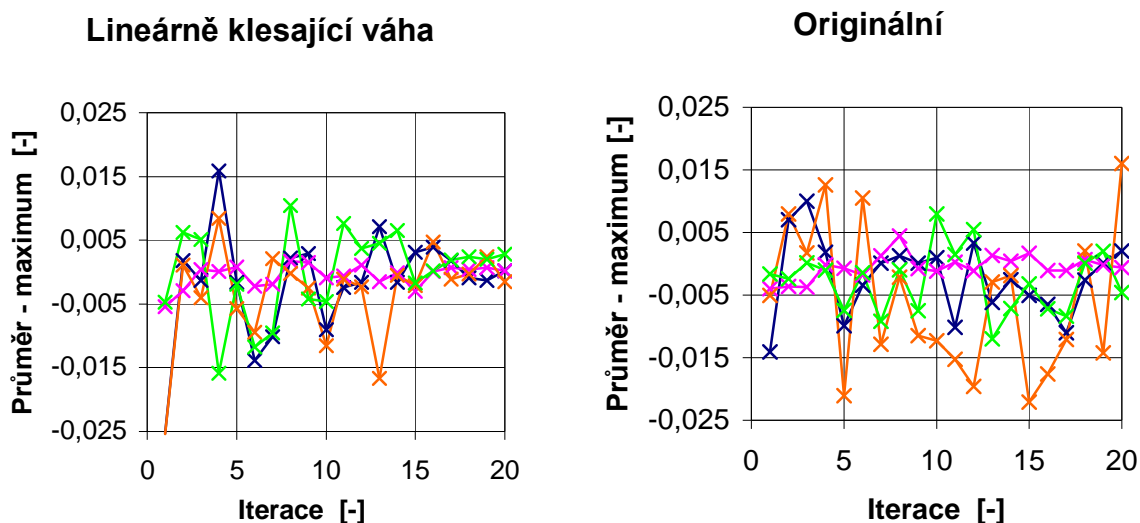
#### Originální



Obr. 4.2 Empirický rozptyl normovaný na rozsah v závislosti na umístění jedince v optimalizaci. Modrá - poloměr rozevřené části trychtýře, růžová - poloměr napájecího vlnovodu, oranžová - délka trychtýřové části antény, zelená - délka napájecího vlnovodu od buzení, fialová - kritériální funkce.

Na obrázku 4.2 je vidět jak při použití rovnice s lineárně klesající váhou jsou nejprve jedinci rozptýleni po řešeném prostoru a poté se během provádění optimalizace shlukují k místu s největší hodnotu kritériální funkce. Naopak při použití rovnice aktualizace rychlosti jedinců s originálními parametry se po celou dobu optimalizace jedinci rozhodují stejně (jestli poletí ke globálnímu maximu nebo ke svému maximu nebo zdali budou setrvávat ve svém směru).

Z těchto grafů (obr 4.2) je také vidět, že rozptyl jedinců se pohybuje maximálně kolem 0,25 (to znamená maximálně 25% rozsahu). Z toho lze usuzovat, že má na umístění jedinců v řešeném prostoru podstatný vliv globální maximum kolem kterého se většina jedinců pohybuje. Jak moc jsou jedinci závislí na vlivu tohoto maxima lze porovnat na následujícím grafu (obr 4.3). Na něm lze vidět, že u optimalizace s lineárně klesající váhou jedinci postupně v optimalizaci letí blíž k globálnímu maximu. Nejznatelnější je to na posledních čtyřech iteracích podle empirického rozptylu normovaného na rozsah i odchylky od globálního maxima. U originální metody jsou jedinci k tomuto maximu táhnuti celou dobu se stejnou intenzitou.

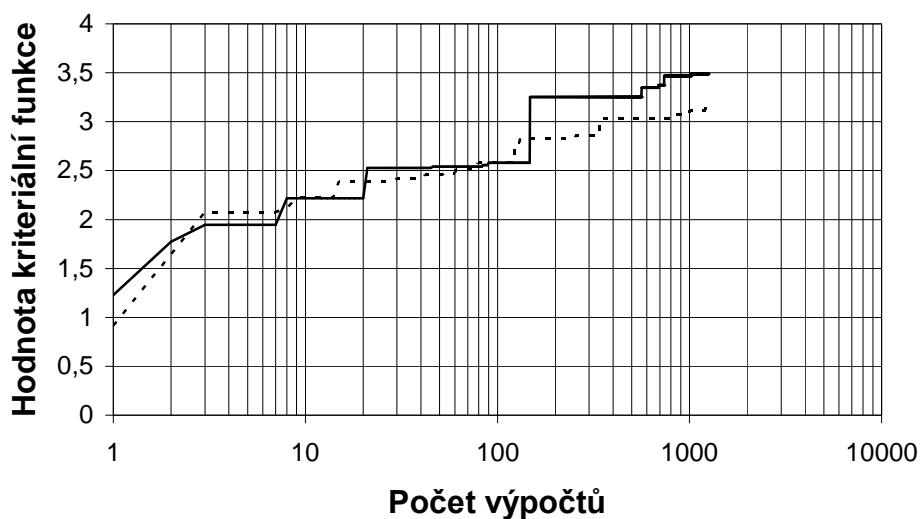


Obr. 4.3 Jednoduchá odchylka průměrného umístění všech jedinců od globálního maxima v dané iteraci. Modrá - poloměr rozevřené části trychtýře, růžová - poloměr napájecího vlnovodu, oranžová - délka trychtýřové části antény, zelená - délka napájecího vlnovodu od buzení.

Dále jsou v práci rozebrány dlouhé optimalizace s velkým počtem výpočtů (1250 výpočtů) ze kterých se budou vyvozovat další vlastnosti obou typů rovnic pro aktualizaci vektoru rychlosti jedinců v PSO.

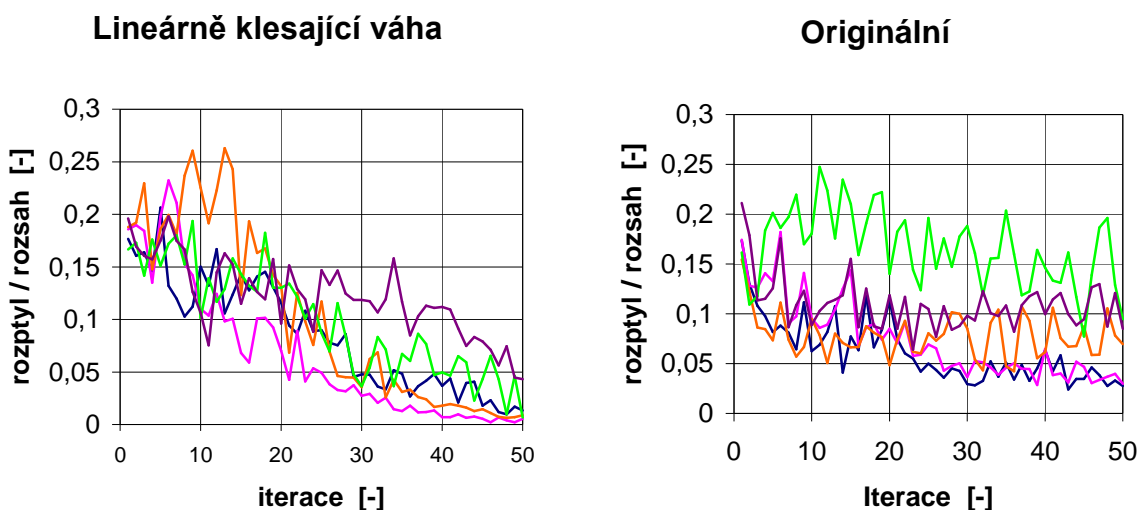
Problematiku popisují grafy se stejným provedením jako byly ty u krátkých optimalizací (obr. 4.1 a 4.2). První graf porovnává růst velikosti kritériální funkce (obr 4.4).

### Porovnání hodnot kritériálních funkcí u dvou typů rovnic aktualizací rychlosti jedinců



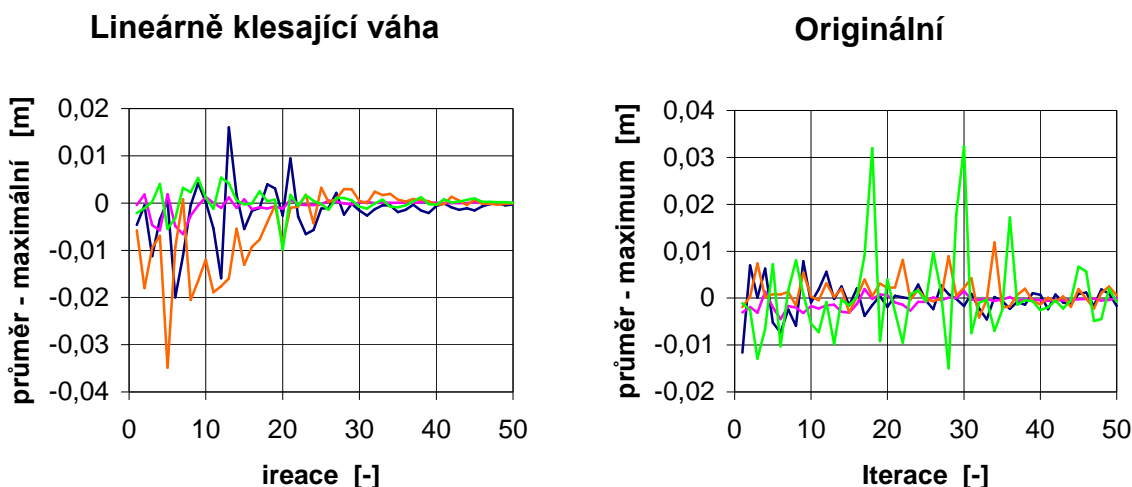
Obr. 4.4 Průběh maximální hodnoty kritériální funkce na počtu výpočtů v PSO optimalizaci u dlouhého výpočtu optimalizováno na maximální hodnotu kritériální funkce. Plná čára – lineárně klesající váha, přerušovaná čára – originální.

Další grafy porovnávají jak moc jsou během optimalizace jedinci rozptýlení po řešeném prostoru. Porovnání je u obou typů rovnic pro aktualizaci vektoru rychlosti částěčky (viz. obr. 4.5).



Obr. 4.5 Empirický rozptyl normovaný na rozsah v závislosti na umístění jedince v optimalizaci. Modrá - poloměr rozevřené části trychtýře, růžová - poloměr napájecího vlnovodu, oranžová - délka trychtýřové části antény, zelená - délka napájecího vlnovodu od buzení, fialová - kritériální funkce.

Následující grafy rozebírají odchylky od nejlepších jedinců (viz. obr. 4.6).

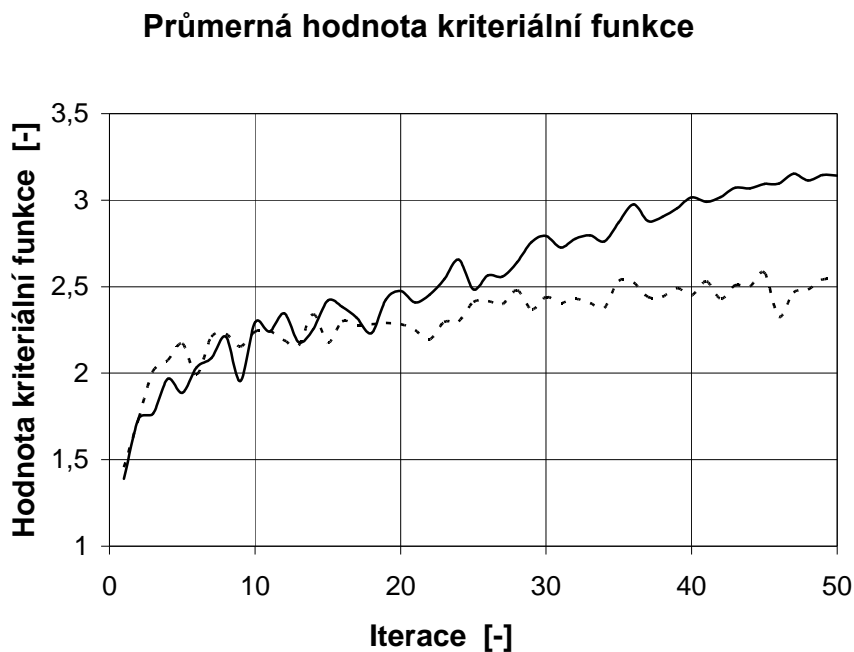


Obr. 4.6 Jednoduchá odchylka průměrného umístění všech jedinců od globálního maxima v dané iteraci. Modrá - poloměr rozevřené části trychtýře, růžová - poloměr napájecího vlnovodu, oranžová - délka trychtýřové části antény, zelená - délka napájecího vlnovodu od buzení.

Z grafů lze vyčíst, že rovnice pro aktualizaci vektoru rychlosti jedince s originálními parametry se dá uplatnit a má lepší využití v krátkých orientačních optimalizacích, kdy od začátku (prvotní inicializace jedinců) míří ke globálnímu maximu s přiměřenou vahou a hlavně si získává přehled o prohledávaném prostoru. Tato vlastnost je naopak nevýhodná u dlouhých optimalizací kdy nám jde více o přesný výsledek. Tato optimalizace by musela mít více „štěstí“ aby se do této hodnoty náhodně strefila.

Oproti tomu optimalizace za použití rovnice pro aktualizaci vektoru rychlosti jedince z lineárně klesající vahou při krátkých optimalizacích, jen na začátku zmapuje celý prostor, ale poté se už soustředí pouze na ten nejlepší výsledek, který byl doposud nalezen. Tím pádem v krátké „orientační“ optimalizaci může přehlédnout okolí hlavního maxima. Zato při dlouhých optimalizacích, kdy nám jde o přesný výsledek, nejprve prohlédne celý řešený prostor a pak se začne postupně zajímat o okolí místa s největší hodnotou kritériální funkce a vyše tam všechny jedince.

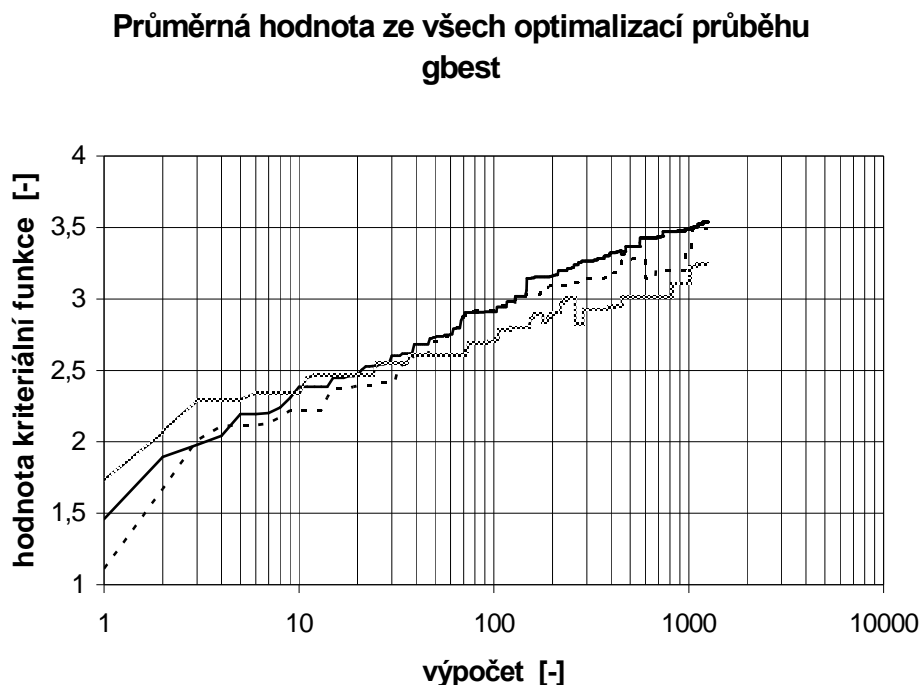
Na závěr této kapitoly je zařazen graf průměrné hodnoty kritériální funkce všech jedinců (v cyklu jedinců) v průběhu optimalizace u obou typů rovnic (obr. 4.7). Průběhy jsou zakresleny pro jednu dlouhou optimalizaci u každého typu rovnice aktualizace rychlosti jedince, protože je zde vidět jak typ rovnice s lineárně klesající vahou směřuje do místa z největší hodnotou kritériální funkce všechny svoje jedince, zato s originálně nastavenými parametry má poměr mezi prohledáváním celého prostoru a směřováním k místu s největší hodnotou kritériální funkce originálně nastaven – průměrná hodnota kritériální funkce je přibližně na stejné výši.



*Obr. 4.7 Průměrná hodnota kritériální funkce na iteraci přes jedince v PSO optimalizaci u dlouhého výpočtu. Plná čára – lineárně klesající váha, přerušovaná čára – originální.*

#### 4.3.2 Porovnání typů okrajových podmínek v PSO optimalizaci pro jednoduchou trychtýřovou anténu

Při porovnávání volby jednotlivých okrajových podmínek nám nejlépe pomůže srovnávání za pomoci průběhu nárůstu kritériální funkce. Průběhy zobrazené na obrázku (4.8) jsou vytvořené tak, že průběhy maximálních hodnot kritériální funkce všech optimalizací s danou okrajovou podmínkou jsou pro zpřesnění výpočtů zprůměrnovány.



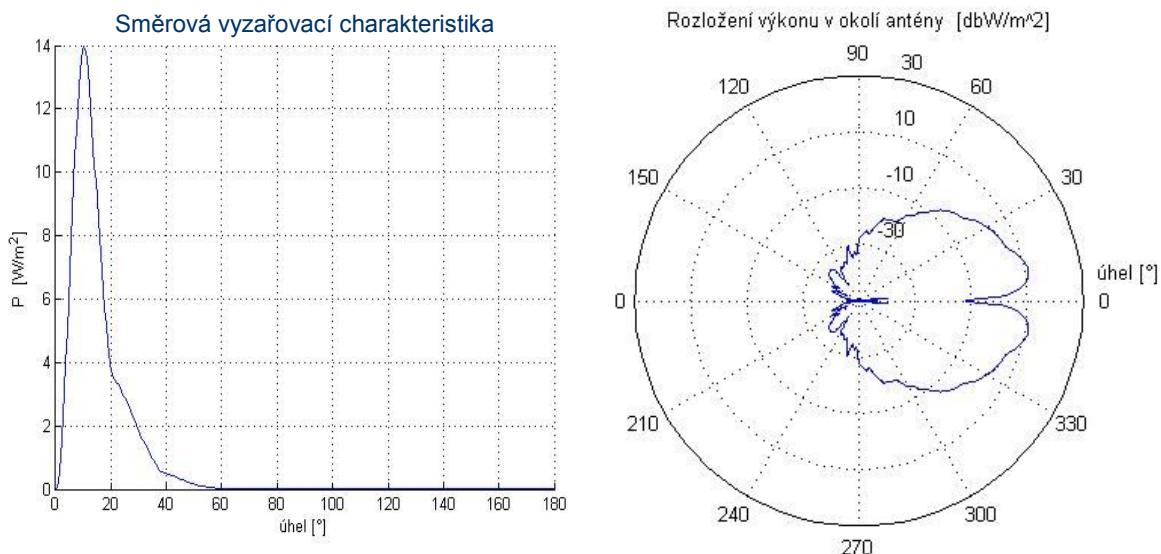
Obr. 4.8 Graf průběhů optimalizací pro porovnání vlivu typů okrajových podmínek. Plná čára – absorpční, přerušovaná – odrazná, šedá – neviditelná.

Podle grafu na obrázku 4.8, má celkově nejlepší hodnotu kritériální funkce absorpční stěna a nejhorší neviditelná stěna. Dá se to vysvětlit tak, že absorpční stěna je více soustředěna na prohledávání okrajů řešeného prostoru a také tím, že po jejím překročení v tom rozměru, vynuluje jedinci rychlost a při další aktualizaci v tomto rozměru letí jedinec směrem k maximu. Neviditelná stěna naopak hledá blíže ke středu řešeného prostoru, jelikož jedinci kteří jsou blíže okraji/stěny jej zpravidla přeletí a jsou vymazáni. Je to z důvodu, protože například nejlepší anténa by byla s nekonečně dlouhou trychtýřovou částí, takže nejlepší délka bude blízko horní zvolené maximální hranice.

#### 4.3.3 Výsledky získané optimalizací rotačně symetrické antény s přidáním lamelové čočky

Lamelová čočka bylo přidána proto, aby zlepšila vyzařovací diagram, hlavně pro dosažení co největší směrovosti. Směrový vyzařovací diagram optimalizované rotačně symetrické trychtýřové antény bez lamelové čočky je zobrazen na obrázku obr. 4.9.

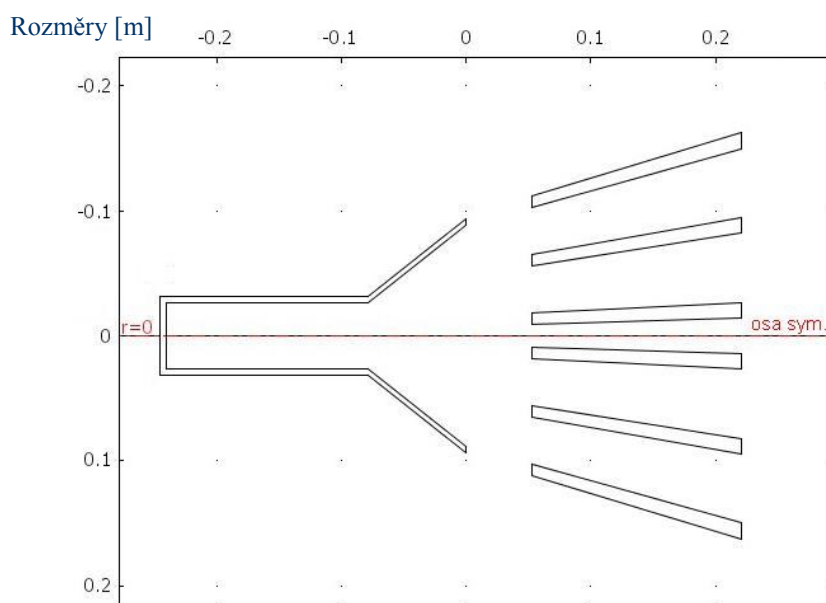




Obr. 4.9 Směrová vyzařovací charakteristika optimalizované trychtýřové antény.

Lamelovou čočku přidáváme za aperturu trychtýřové antény. Nejprve budeme třílamelovou anténu optimalizovat pomocí stejné kritériální rovnice jako předchozí anténu. Optimalizovat budeme jak rozměry trychtýřové antény (vnitřní poloměr vlnovodu, poloměr její apertury, délku napájecího vlnovodu, délku trychtýřové části antény) tak i její lamelovou čočku u které jsou jako optimalizované parametry zvoleny délka lamel, jejich vzdálenost od trychtýřové antény, šířka lamel na začátku, vzdálenost první lamely od osy antény, mezera mezi lamelami na začátku a vzdálenost středu, ze kterého lamely teoreticky vycházejí.

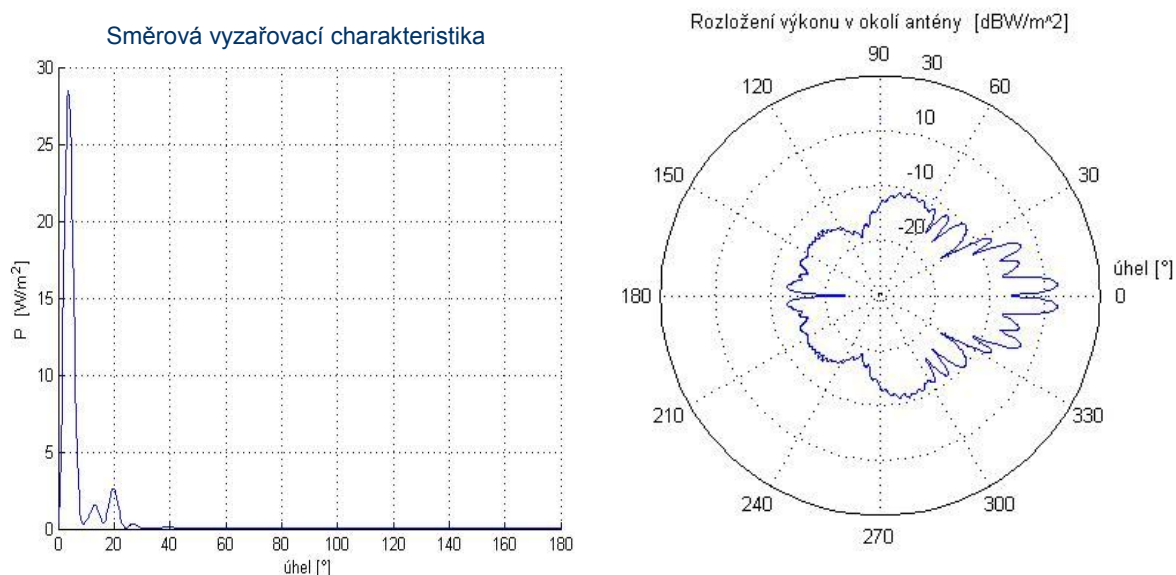
Při těchto optimalizacích (s lamelovou čočkou) šlo o dosažení optimálních výsledků a ne o otestování PSO optimalizace, takže byla nastavena maximální velikost konečného prvku v PSO optimalizaci na hodnotu  $1/10$  vlnové délky  $\lambda$ . Tím se výrazně zpomalil proces optimalizace, ale výsledky jsou přesnější.



Obr. 4.10 Optimalizované rozměry rotačně symetrické trychtýřové antény s třílamelovou čočkou.

Optimalizované rozměry jsou orientačně uvedeny na obrázku 4.10. Přesný výkres této antény je uveden v příloze.

Pro představu - vnitřní poloměr vlnovodu 26,185 mm, poloměr její apertury 88,465 mm, délku napájecího vlnovodu 162,49 mm, délku trychtýřové části antény 78,22 mm, délka lamel 168,60 mm, jejich vzdálenost od trychtýřové antény 52,25 mm, šířka lamel na začátku 8,89 mm, vzdálenost první lamely od osy antény 9,62 mm, mezera na začátku mezi lamelami 37,82 mm a vzdálenost středu ze kterého lamely teoreticky vycházejí 317,27 mm.

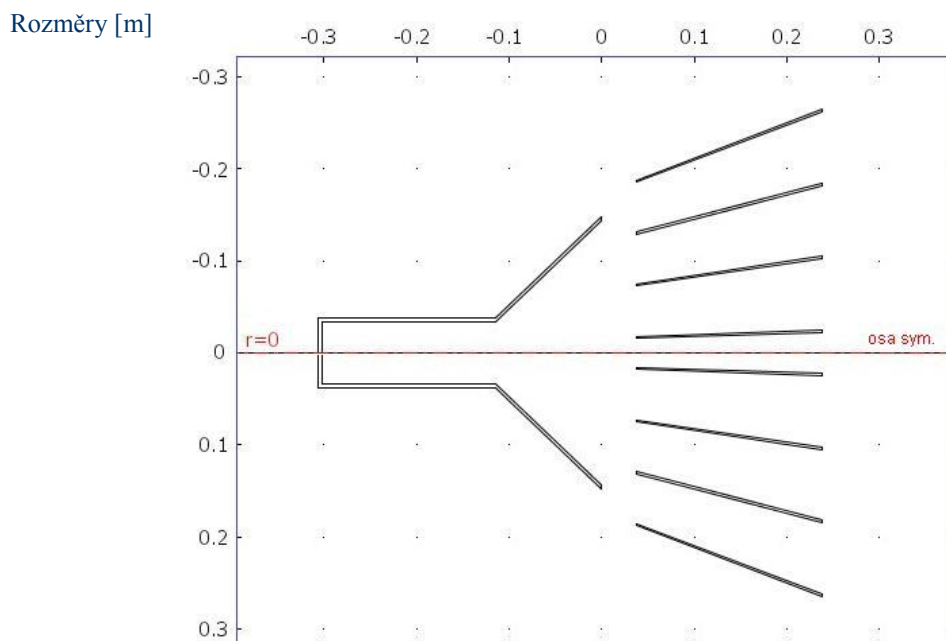


Obr. 4.11 Směrová vyzařovací charakteristika optimalizované trychtýřové antény tří lamelovou čočkou.

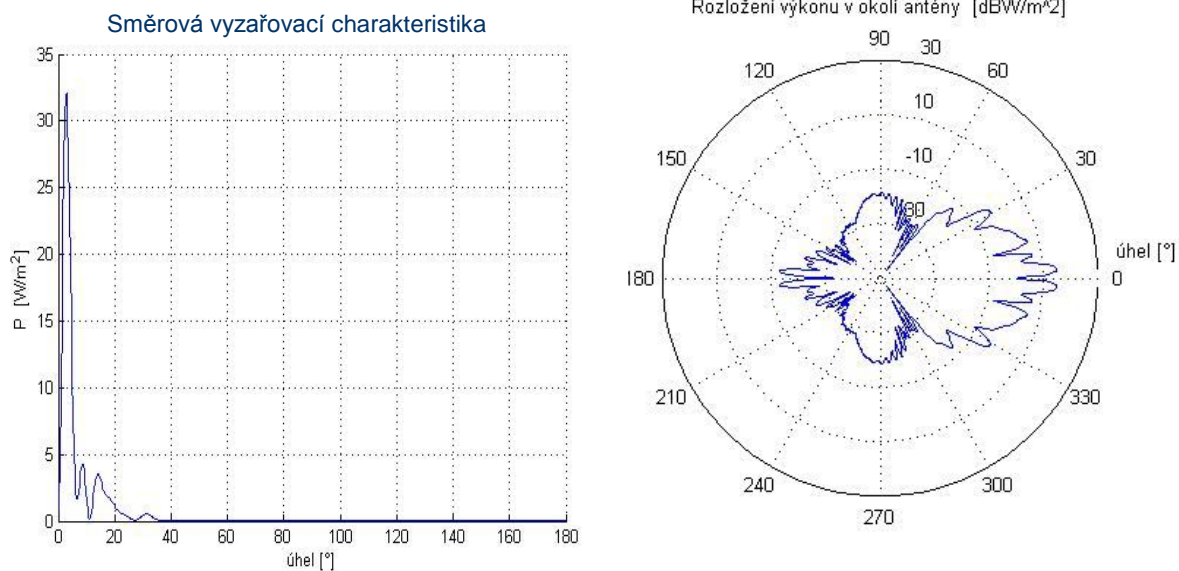
Z výsledků směrové vyzařovací charakteristiky (viz. obr. 4.11) je patrné, že se vlastnosti a kvalita navržené antény oproti návrhu bez čočky zlepšila. Například výkon ve směru záření se zdvojnásobil, úhel záření se dostal na hodnotu méně než třetinovou a činitel odrazu se zvětšil z -20,3 dB na -17,5 dB. Pokud přidáme ještě o jednu lamelu u čočky více a znovu se podíváme na výsledky optimalizace.

Optimalizované rozměry jsou opět uvedeny orientačně na obrázku 4.12.

Pro představu: vnitřní poloměr vlnovodu 33 mm, poloměr její apertury 142,91 mm, délku napájecího vlnovodu 179,64 mm, délku trychtýřové části antény 115,27 mm, délka lamel 200 mm, jejich vzdálenost od trychtýřové antény 38,16 mm, šířka lamel na začátku 6,48 mm, vzdálenost první lamely od osy antény 16,06 mm, mezera na začátku mezi lamelami 54,59 mm a vzdálenost středu ze kterého lamely teoreticky vycházejí 449,36 mm.



Obr. 4.12 Optimalizované rozměry rotačně symetrické trychtýřové antény s čtyřlamelovou čočkou.



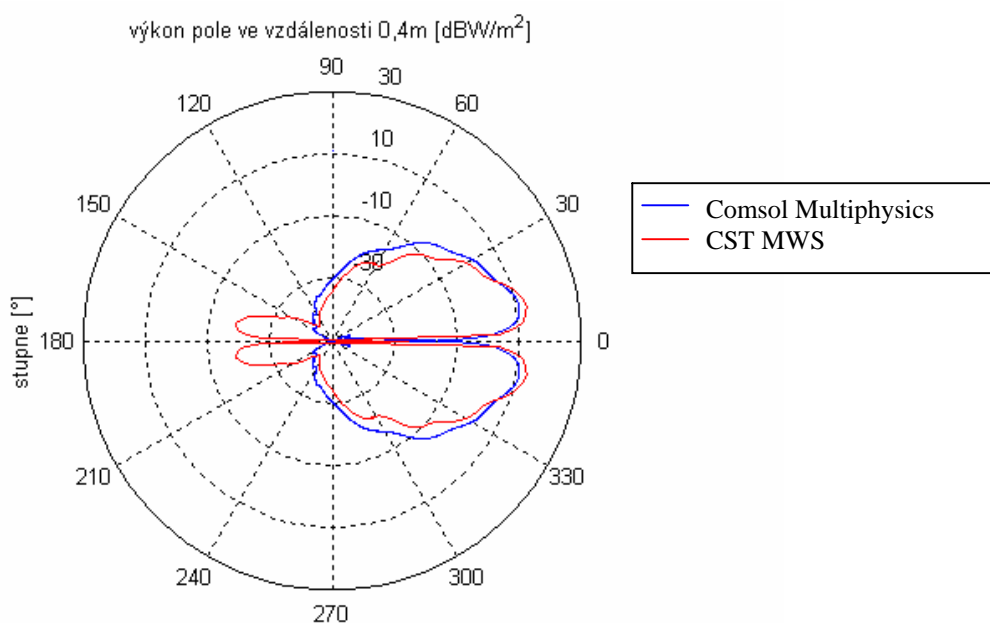
Obr. 4.1 Směrová vyzařovací charakteristika optimalizované trychtýřové antény čtyřlamelovou čočkou.

Z obrázku 4.12 lze vidět jak se poměnila konstrukce a rozmístění lamel u optimalizované antény při zvýšení počtu lamel na čtyři. Z grafu směrové vyzařovací charakteristiky (obr.4.13) je vidět jisté zmenšení vyzařování antény dozadu i do stran, zvýšení výkonu pole v hlavním směru záření bylo o 0,5 dB to je z  $28,4 \text{ W/m}^2$  na  $31,9 \text{ W/m}^2$  a úhel vyzařování se zmenšil z  $3,59^\circ$  na  $2,59^\circ$ . Činitel odrazu na vstupu antény byl dosažen -13,6 dB.

## 5 Ověření dosažených výsledků v programu CST Microwave Studio

### 5.1 Jednoduchá trychtýřová anténa s optimalizovanými rozměry

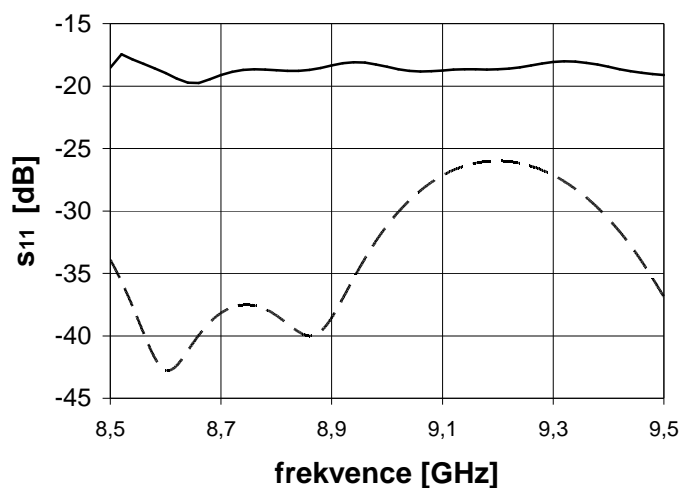
Výsledné charakteristiky této antény se téměř shodovaly ve směrovém vyzařovacím diagramu (obr. 5.1), pouze u modelu v CST MWS se navíc objevily výrazné zadní laloky, které by mohly být způsobeny odrazem od apertury trychtýřové antény (viz. obr. 5.1).m<sup>2</sup>



Obr. 5.1 Směrová vyzařovací charakteristika optimalizované trychtýřové antény v programu Comsol i CST MWS.

Srovnávání výsledků hodnoty parametru  $s_{11}$  u jednoduché trychtýřové antény oproti směrové vyzařovací charakteristice už tak shodné nebylo (obr. 5.2). Například u hodnoty frekvence 9 GHz byla hodnota parametru  $s_{11}$  v programu Comsol Multiphysics  $s_{11}(9\text{GHz}) = -18,46$  dB zato v programu CST Microwave Studio bylo  $s_{11}(9\text{GHz}) = -31,1$  dB. Největšího rozdílu bylo dosaženo na frekvenci 8,6 GHz kdy v programu Comsol Multiphysics  $s_{11}(8,6\text{GHz}) = -18,98$  dB a v programu CST MWS bylo  $s_{11}(8,6\text{GHz}) = -42,28$  dB z toho plyne rozdíl 23,3 dB, což je čtrnáctinásobný rozdíl! Tento jev mohl být způsoben rozdílnou numerickou metodou výpočtu nebo odlišnými okrajovými podmínkami.

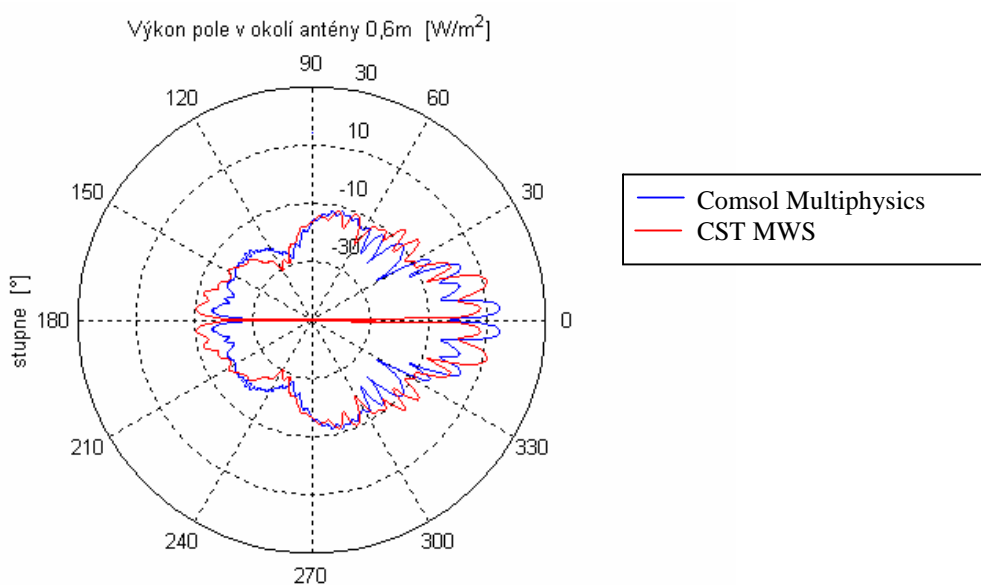
### Porovnání činitele odrazu



Obr. 5.2 Porovnání parametru činitele odrazu u optimalizované trychtýřové antény v programu Comsol (plná čára) a CST MWS (přerušovaná).

## 5.2 Trychtýřová anténa s optimalizovanými rozměry a zařazenou lamelovou čočkou za její aperturu

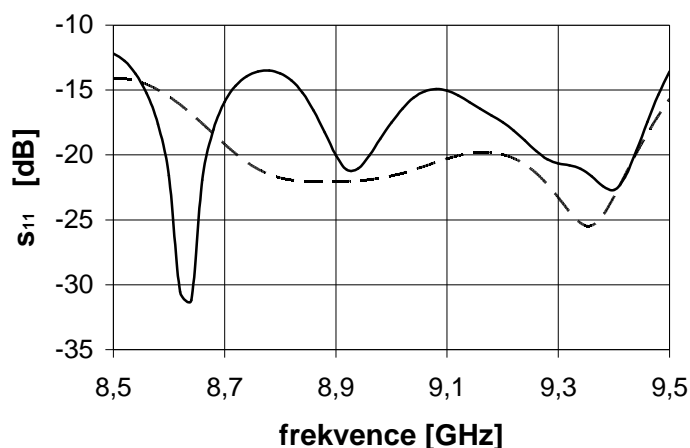
Porovnání směrových vyzařovacích charakteristik (obr. 5.3) u třílamelové čočky nebyly dokázány tak dobré výsledky jako u simulace v CST. Hlavní vyzařovací lalok nezáří do úhlu  $6^\circ$  ale  $12^\circ$ , celkově je ale směrovější než jednoduchá trychtýřová anténa.



Obr. 5.3 Směrová vyzařovací charakteristika optimalizované trychtýřové antény v programu Comsol i CST MWS.

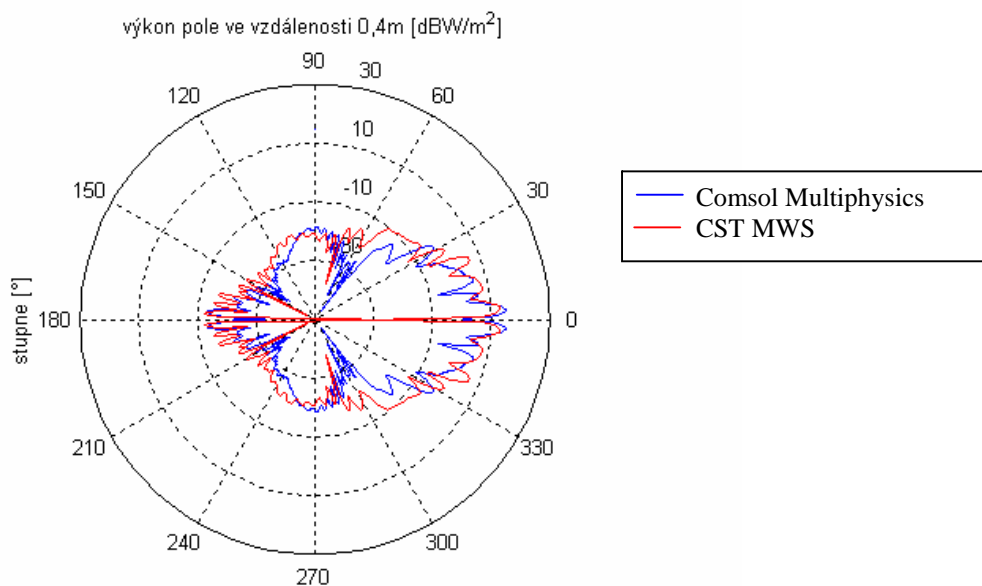
Porovnání činitele odrazu (viz. obr. 5.4) je už oproti předešlému případu (jednoduchá trychtýřová anténa) srovnatelně lepší. Program Comsol Multiphysics počítá pro každou frekvenci nový výpočet, proto je hodnota jím vypočítaného činitele odrazu méně „hladká“.

**Porovnání činitele odrazu**



*Obr. 5.4 Porovnání parametru činitele odrazu u optimalizované trychtýřové antény s lamelovou čočkou v programu Comsol (plná čára) a CST MWS (přerušovaná).*

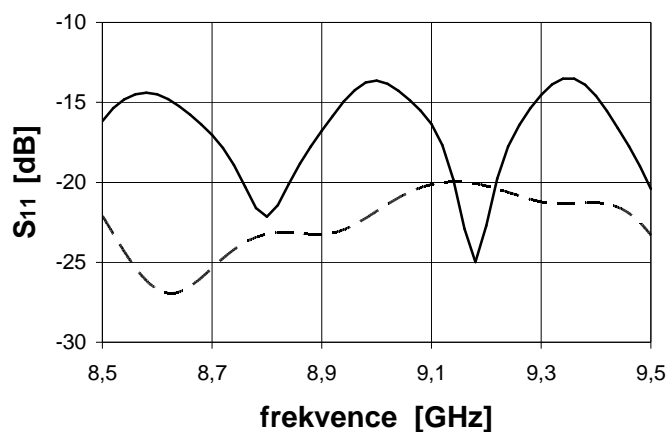
Porovnání směrových vyzařovacích charakteristik (obr. 5.5) u čtyřlamelové čočky byly ověřeny shodné vyzařovací vlastnosti u obou simulačních programů. Hlavní vyzařovací lalok, směr vyzařování i velikost výkonu se shodují.



*Obr. 5.5 Směrová vyzařovací charakteristika optimalizované trychtýřové antény v programu Comsol i CST MWS.*

Graf porovnání činitele odrazu u čtyřlamelové čočky (viz. obr. 5.6) je již podle předchozích výsledků odlišný u obou programů. To může být způsobeno jak již bylo zmíněno z některých odlišností obou výpočtů v různých programech (jiná numerická metoda výpočtu, odlišné okrajové podmínky, atd.).

### Porovnání činitele odrazu



Obr. 5.6 Porovnání parametru činitele odrazu u optimalizované trychtýřové antény s čtyřlamelovou čočkou v programu Comsol (plná čára) a CST MWS (přerušovaná).

## 6 Závěr

Po navržení a nasimulování trychtýřové antény v programu Comsol Multiphysics, byly v osově symmetrickém (2D) i trojrozměrném modelu výsledky vyzařovacích charakteristik i rozložení elektrického a magnetického pole téměř shodné. Proto mohl být osově souměrný model využit k optimalizaci.

Optimalizací rozměrů trychtýřové antény na zadaném kmitočtu 9 GHz pomocí algoritmu PSO byl snížen úhel vyzařování antény o  $21,6^\circ$  a zvýšena směrovost o 6,57 dB. Ke zvýšení směrovosti antény byla před ústí trychtýřové antény přidána lamelová čočka se třemi resp. čtyřmi lamelami. Výsledný model byl optimalizován a jeho směrovost dále zvýšena z 16,5 dBi na 20,5 dBi a úhel vyzařování dále snížen ještě o  $9,2^\circ$  na  $2,9^\circ$ .

Modely samotné trychtýřové antény i varianty s lamelovou čočkou byly ověřeny v programu CST Microwave Studio s dobrou shodou ve vyzařovacím diagramu. Přesto se vyzařovací úhel antény s třílamelovou čočkou  $3,6^\circ$  nepodařilo potvrdit. U čtyřlamelové čočky byl úhel vyzařování totožný v obou programech. U činitele odrazu parametru nebyla dosažena shoda u jednoduché trychtýřové antény, ale potvrdila se u trychtýřové antény s lamelovou čočkou.

Při posuzování vlivu typu mezí prohledávaného prostoru, tzv. zdí algoritmu PSO byla jako nejprůzračnější pro daný řešený problém optimalizaci rotačně symetrické trychtýřové antény vybrána absorpční zeď, a to jak při posuzování hodnoty kritériální funkce tak i při zahrnutí ostatních podmínek jako je doba simulace a reprodukovatelnost dosažení stejné dosažené hodnoty kritériální funkce i při další optimalizaci. Nejméně příznivou byla stěna neviditelná.



## 7 Literatura

- [1] Autor neznámý. *FEMLAB 3 Modeling guide*. Comsol AB. 2004-01.
- [2] RAIDA, Zbyněk. *Počítačové řešení komunikačních systémů* [online]. 2006-10-22 [cit. 2007-03-27].  
<[http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/brks/brks\\_cz.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/brks/brks_cz.pdf)>
- [3] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení* [online]. 2006-05-15 [cit. 2007-05-07].  
<[https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Elmag\\_vlny\\_anteny\\_a\\_vedeni\\_S.pdf](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Elmag_vlny_anteny_a_vedeni_S.pdf)>
- [4] HANUS, Stanislav, SVAČINA, Jiří. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika* [online]. 2005-05-15 [2007-09-24].  
<[https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Vf\\_a\\_mikrovlenna\\_technika\\_S.pdf](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Vf_a_mikrovlenna_technika_S.pdf)>
- [5] IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, February 2004, VOL. 52, NO.2, p. 397-407
- [6] Autor neznámý. *METODA KONEČNÝCH PRVKŮ*. Článek [online]. [cit. 2007-02-05]. <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>>

## 1. Zdrojový kód pro kořeny Besselovy funkce

```
function out = koreny( m, n)
%program pro výpočet kořenů derivace Besselovy funkce 1. druhu
%v daného řádu např pro výpočet vidů v kruhovém vlnovodu
% počet kořenů které hledáme v m-tém řádu
% derivace Besselovy funkce 1. druhu
% m = řád Besselovy funkce

d=0.0000001; %rozmezí delta numerické derivace
dx = 0.1;    %pomocná hodnota kroku musí být
              %menší než minimální vzdálenost kořenů
x = dx;      %momentální umístění ve funkci
i=0;         %ukazatel řešeného kořene (n v TEMn)
koren = 0;
while i < n
    i=i+1;    %celkový cyklus při hledání kořenů
    j=(besselj(m,x+d)-besselj(m,x-d))/(2*d); %výpočet derivace
                                              %Besselovy funkce 1. druhu v místě x
    s=j/abs(j);
    while (j/s)>0    %cyklus který nalezne okolí kořenu
        min =x;
        x = x + dx;
        j=(besselj(m,x+d)-besselj(m,x-d))/(2*d);
        max=x;
    end
    while abs(j)>0.000000005 %cyklus který v tomto rozmezí nalezne kořen
        alfa=(max+min)/2;
        j=(besselj(m,alfa+d)-besselj(m,alfa-d))/(2*d);
        if (j/s)<0
            max=alfa;
        else
            min = alfa;
        end
    end
    koren(i)=alfa; %kořeny uspořádá do vodorovné matice
end
out=koren;
```

## 2. Zdrojový kód PSO optimalizace

```
function mojemax=PSO4r(wall_type)
%funkce která dokáže vrátit ideální velikosti rozměrů funce která je
%zpracovává funkcí idealita po předání rozměrů a navracení jak byly rozměry
%dobré, čím vyšší hodnota tím lepší. možno zvotit tři typy stěn: absorbcni,
%odrazna a neviditelna

%určení maxim a minim měněných paramettů, jednotlivé sloupce - jednotlivé
%rozměry
xmin=[0.017 0.017 0.05 0.15];
xmax=[0.1 0.04 0.15 0.20];
```

```
%konstanty

pocet_jedincu = 25;
pocet_rozmeru = 4;
pocet_iteraci = 35;

%inicializace používaných proměnných

pocet_kroku=(pocet_iteraci+1)*pocet_jedincu;
hotovo=0;
gbest = zeros( pocet_rozmeru,1);
hpbest = -Inf*ones(1,pocet_jedincu);
pbest = -Inf*ones(pocet_rozmeru,pocet_jedincu);
hx = zeros( pocet_jedincu,1);
hgbest=-Inf;
jedinci=ones(1,pocet_jedincu);

for d=1:pocet_rozmeru
    rozsahv(d,1)=0.2*(xmax(d)-xmin(d));
    odchylkav(d,1)=0.1*(xmax(d)-xmin(d));
    rozsahx(d,1)=(xmax(d)-xmin(d))-2*rozsahv(d,1);
    odchylkax(d,1)=xmin(d)+2*odchylkav(d,1);
end

%prvotní inicializace umístění jedinců a jejich rychlostí

for d=1:pocet_jedincu

x(1:pocet_rozmeru,d)=rozsahx(:,1).*rand(pocet_rozmeru,1)+odchylkax(:,1);
    v(1:pocet_rozmeru,d)=rozsahv(:,1).*rand(pocet_rozmeru,1)-
odchylkav(:,1);
end

%hlavní výpočet
for w=0.9:(0.4 - 0.9)/pocet_iteraci:0.4 %cyklus iteraci

for n=1:pocet_jedincu      %cyklus jedincu

    % zobrazování stavu PSO v %
    hotovo=hotovo+1;
    if jedinci(n)==1
        disp([' Hotovo je ' num2str(hotovo/pocet_kroku*100) '% ' ]);

        hx(n)=idealita(x(1,n),x(2,n),x(3,n),x(4,n));      %vypocet kritériální
funkce

        %Zjišťování zda nejsme v lokálním maximu jedince
        if (hx(n)>hpbest(n))
            pbest(:,n)=x(:,n);
            hpbest(n)=hx(n);
        end
        %Zjišťování zda nejsme v globálním maximu
        if (hx(n)>hgbest)
            gbest(:,1)=x(:,n);
            hgbest=hpbest(n);
        end
        %aktualizace rychlosti možno vybrat ze dvou možností
        v(:,n)=w*v(:,n)+1.494*rand(pocet_rozmeru,1).*(pbest(:,n)-
x(:,n))+1.494*rand(pocet_rozmeru,1).*(gbest(:,1)-x(:,n));
        %
        v(:,n)=0.729*(v(:,n)+2.8*rand(pocet_rozmeru,1).*(pbest(:,n)-
x(:,n))+1.3*rand(pocet_rozmeru,1).*(gbest(:,1)-x(:,n)));
```

```

        %aktualizace umístění částčky
x(:,n)=x(:,n)+v(:,n);

        %výběr stěny

switch (wall_type)
    %absorpcni stěna
    case 'absorbcni'
        for k=1:pocet_rozmeru;
            if x(k,n)>xmax(k)
                v(k,n)=0;
                x(k,n)=xmax(k);
            end
            if x(k,n)<xmin(k)
                v(k,n)=0;
                x(k,n)=xmin(k);
            end
        end

        %odrazna
    case 'odrazna'
        znak=1;
        while znak==1
            znak=0;
            for k=1:pocet_rozmeru;
                if x(k,n)>xmax(k)
                    v(k,n)=-v(k,n);
                    x(k,n)=2*xmax(k)-x(k,n);
                    znak=1;
                end
                if x(k,n)<xmin(k)
                    v(k,n)=-v(k,n);
                    x(k,n)=2*xmin(k)-x(k,n);
                    znak=1;
                end
            end
        end

        %neviditelna
    case 'neviditelna'
        for k=1:pocet_rozmeru;
            if x(k,n)>xmax(k)
                jedinci(n)=0;
            end
            if x(k,n)<xmin(k)
                jedinci(n)=0;
            end
        end

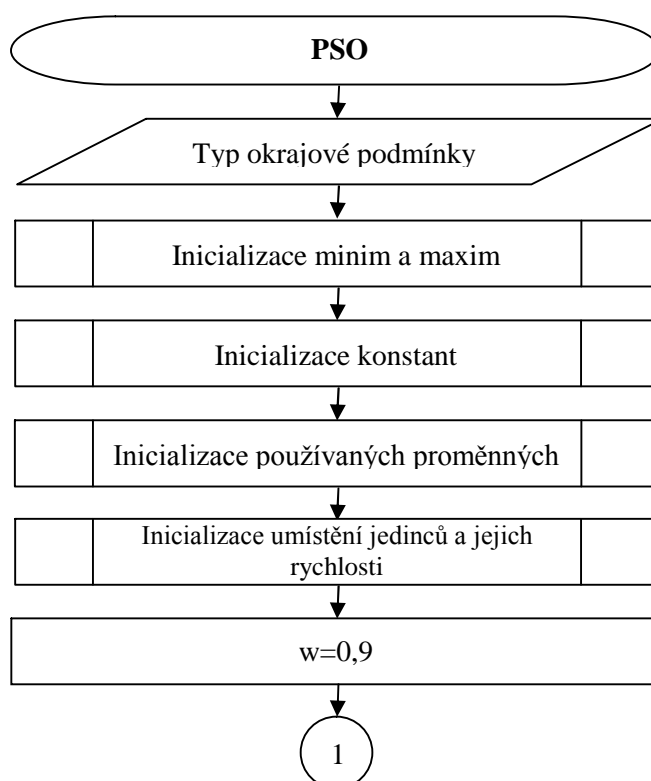
end

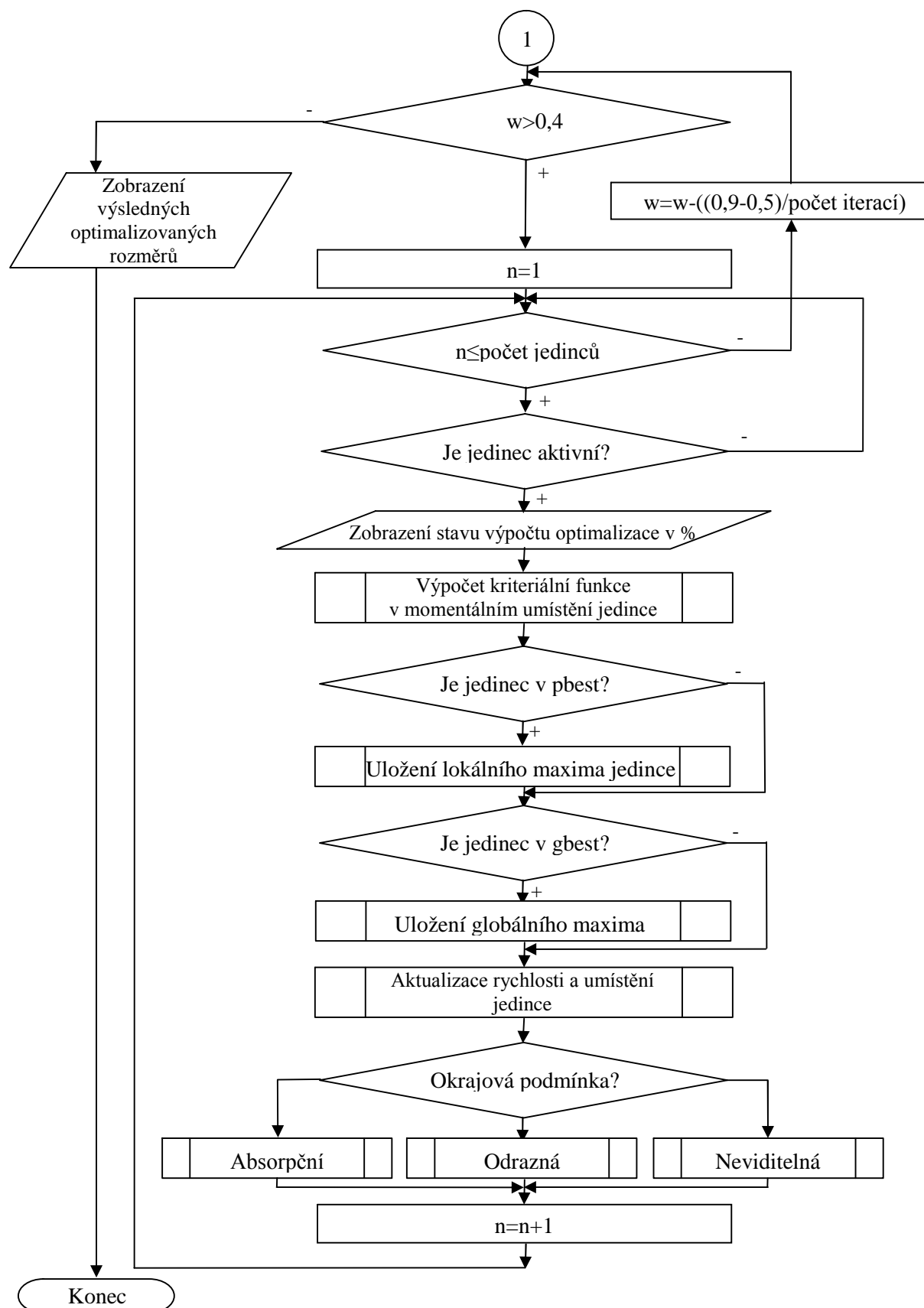
end
end
end

%výpis ideálních parametrů postupně jak jsou a začátku zadány
mojemax = gbest;

```

### 3. Schéma znázornění algoritmu PSO optimalizace trychtýřové antény





druhá polovina Algoritmu PSO optimalizace trychtýřové antény

## 4. Výkresy optimalizovaných trychtýřových antén

Jsou zde uvedeny jen vnitřní optimalizované rozměry. Tloušťka stěn byla nastavena na 5 mm. Měřítko 1:4.

